

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES – ITBA

ESCUELA DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Caracterización de material y análisis de proceso de fabricación de un acero aleado API 60K

AUTOR/ES: Gonzalez Calderón, Facundo (Leg. N° 56072)

DOCENTE/S TITULAR/ES O TUTOR/ES: Rodríguez, Aníbal Adrián

Jeandet, Fabián

Índice

1.	Resumen	3
2.	Introducción	3
2.1	La empresa	3
2.2	Acero Moldeado	3
3.	Objetivos.....	4
4.	Marco Teórico.....	4
4.1	Fundamentos Técnicos del proceso productivo.....	4
A.	Hornos y procedimiento de fusión	5
B.	Moldes	6
C.	Técnica de colada y solidificación.....	9
D.	Tratamientos térmicos	10
E.	Defectos en el acero moldeado.....	12
4.2	Métodos de ensayo	13
A.	Composición Química	13
B.	Macrografía	14
C.	Metalografía	15
D.	Dureza y Microdureza	15
E.	Tracción	17
F.	Observación de superficie de fractura	18
G.	Templabilidad - Jominy.....	18
H.	Impacto – Charpy.....	20
5.	Desarrollo y resultados.....	21
5.1	Caracterización de acero API 60K Grado A en cada etapa de fabricación	21
A.	Composición Química	22
B.	Macrografía	22
C.	Metalografía	22
D.	Dureza y Microdureza	25
E.	Tracción	25
F.	Observación de Superficie de Fractura	26
G.	Composición de inclusiones con SEM-EDS	27
5.2	Análisis de aleación de prueba API 60K Grado C y estudio de la variación de las propiedades con el espesor	29
A.	Composición Química	30
B.	Macrografía	30
C.	Metalografía	30
D.	Dureza y Gradiente de Dureza.....	33

E.	Tracción	35
F.	Observación de superficie de fractura	36
G.	Impacto – Charpy.....	37
H.	Templabilidad - Jominy.....	38
6.	Conclusión	38
7.	Bibliografía.....	40
8.	Anexo.....	40

1. Resumen

En el presente trabajo se estudió una aleación de acero fabricado por la empresa Microwen bajo norma API 6A tipo 60K para la manufactura de productos aplicados en la industria del petróleo. Se realizó una caracterización del material mediante ensayos mecánicos, tales como metalografías, dureza, tracción, impacto, templabilidad y composición química del material e inclusiones no metálicas presentes en el mismo. Para esto se utilizaron máquinas herramienta y máquinas de ensayo tanto de propiedad del ITBA como de la empresa y laboratorios externos, siguiendo las técnicas y prácticas adecuadas según una variedad de normas aplicadas a este tipo de prácticas. En una segunda etapa se estudió la influencia de la variación de espesores de las piezas, utilizando probetas de distintas geometrías representativas de estos efectos. Por último se estudió una variante de la aleación de fabricación normal de la empresa, comparando sus propiedades y comportamientos con el material original. Si bien esta nueva aleación fue rechazada por no superar a su original en aspectos fundamentales requeridos por norma^[4], la misma sí presentó mejoras significativas en algunas de las propiedades estudiadas.

2. Introducción

2.1 La empresa

El trabajo desarrollado se llevó a cabo en Wenlen S.A.^[2], particularmente en su planta de fundición y ensamblado Microwen S.A. donde se fabrican piezas de acero moldeado inoxidable y de aleación. La empresa fundada en el año 1976 se encuentra ubicada en Argentina, en la localidad de Bella Vista, provincia de Buenos Aires. Cuenta con dos plantas donde se realizan todos los procesos de fabricación de sus productos y equipos orientados a la industria del petróleo y gas. Los principales productos que ofrece son: cabezales de pozo y armaduras de surgencia, cabezales de fractura (hasta 15.000 PSI) e independientes (1.000 a 3.000 PSI), válvulas esclusas API 6A, válvulas esféricas fundidas, válvulas orbitales, sistemas de seguridad, actuadores hidráulicos y neumáticos de simple y doble efecto, sistemas de control, entre otros. En su acería propia cuenta con hornos de inducción para la fabricación de aceros al carbono, aleados, inoxidables, Dúplex y Super Dúplex. Para el desarrollo del trabajo en cuestión, el enfoque será sobre el proceso de fabricación de acero aleado en molde de fundición bajo norma API 6A en las instalaciones de la planta de Microwen S.A.

2.2 Acero Moldeado

Acero moldeado es el nombre que se le da generalmente al grupo de aleaciones de hierro-carbono, que reciben su forma definitiva mediante una colada en molde. Esta metodología permite un amplio espectro de geometrías, siempre y cuando el proceso de fabricación sea adecuado y contemple los parámetros necesarios de diseño del molde. En aceros moldeados, la dificultad radica esencialmente en la elevada temperatura de fusión del acero y su fuerte contracción. Esto genera el riesgo de obtener rechupes, porosidades, desprendimientos del molde y una variedad de defectos cuya solución radica en técnicas de colada especiales que garanticen una solidificación dirigida.

En términos generales, las técnicas de fusión del acero moldeado son similares a las de los aceros de forja o laminados. En particular para el moldeo, es recomendado utilizar aceros calmados con silicio que

permiten generar piezas con un grado mínimo de porosidad. La técnica difiere en los primeros pasos del proceso, donde se obtienen piezas de metal a partir de acero líquido coladas en moldes adecuados para luego ser sometidas a un tratamiento térmico de normalizado. Este último permite homogeneizar la estructura del material y relevar tensiones residuales propias de la solidificación. Posteriormente, la pieza queda con una estructura similar a una forjada o laminada de igual composición y tratamiento térmico. La diferencia entre los distintos métodos se ve reflejada entonces en la anisotropía de las propiedades mecánicas propia de un acero que ha sufrido deformación plástica durante el proceso de fabricación, fenómeno que no ocurre en piezas moldeadas.

Las propiedades alcanzadas para este tipo de aceros dependerán de la composición química y tratamientos térmicos a los cuales se los someta, caracterizándose por su alta resistencia manteniendo un alargamiento y resiliencia considerables. Estos aspectos son favorables para su aplicación en condiciones donde se requiera elevada resistencia mecánica y buena absorción de impactos en un rango amplio de temperaturas. Por otra parte, su buena soldabilidad garantiza un método eficiente de eliminación de defectos de colada, compensando las dificultades principales de fabricación.

3. Objetivos

Realizar caracterización de acero aleado fabricado según norma API 60K y su característica bajo condiciones normales de fabricación en cada una de sus etapas:

- materia prima,
- fundición,
- colado,
- tratamiento térmico.

Hacer hincapié en algunos lotes que se ha tenido dificultades en comprender ciertos fenómenos metalúrgicos que llevan a comportamientos no esperados de la aleación. Se tratará de caracterizar y dar un análisis del comportamiento de lotes de productos fabricados con diversas variables del proceso.

Las técnicas experimentales a realizar serán:

- Caracterización del material para cada etapa de fabricación:
 - Metalografía
 - Dureza y microdureza
 - Ensayo de tracción y observación en lupa de la superficie de fractura
 - Microscopía electrónica de barrido + EDS
 - Ensayos de Jominy

A su vez se abordarán las siguientes competencias:

- Interpretación de los resultados y vinculación con cada etapa del proceso
- Análisis de diversos tratamientos térmicos de las muestras
- Búsqueda de oportunidad de mejora del proceso utilizado por la empresa

4. Marco Teórico

4.1 Fundamentos Técnicos del proceso productivo

En esta sección se describirán los métodos y características del proceso de fundición de aceros aleados, los cuales serán objeto de análisis en la extensión del trabajo. Se describirán también los defectos más comunes de este tipo de aceros con el objetivo de brindar un marco de referencia para el posterior análisis particular de cada etapa del proceso.

A. Hornos y procedimiento de fusión

Los hornos utilizados en la empresa son hornos de inducción INDUCTOTHERM con revestimiento básico y capacidad de carga de 1,5 y 2 toneladas (ver Figura 1). El acero obtenido mediante este tipo de hornos es menos frágil que los obtenidos con hornos ácidos. Este tipo de hornos son propensos a agrietarse y por eso requieren del recambio periódico de su revestimiento. También tienen la desventaja de que su escoria es fría y de poco contacto con el acero, lo cual limita las posibilidades de efectuar procesos metalúrgicos. Es por esto que las características y la calidad de la materia prima son de especial importancia en estos casos. En el caso de Microwen S.A. la materia prima está compuesta principalmente por chatarra de acero de estampa, retorno de procesos propios y paquetes de chapa compactada, como se muestra en la Figura 2 . Estos se cargan en los hornos con una cama de grafito, el cual baja el punto de fusión del acero.

El proceso de fundición en el horno suele tardar entre 2 y 3 horas aproximadamente, dependiendo del tamaño del lote. Los mismos cuentan con una unidad de potencia, como la que se muestra en la Figura 1 a la derecha, que proporciona una potencia de aproximadamente 300kW por tonelada a través de bobinas de cobre refrigeradas por agua. El interior del horno alcanza una temperatura de 1650°C, suficiente para fundir la carga. Por otro lado, se calienta la cuchara con quemadores por encima de los 1000°C para minimizar el enfriamiento del acero al vaciarlo del horno (ver Figura 3).



Figura 1. Horno de inducción INDUCTOTHERM y su unidad de potencia



Figura 2. Materia prima en forma de retorno de producción (izquierda) y recortes de chapa (derecha)



Figura 3. Cuchara de colado siendo precalentada por encima de los 1000°C con quemadores

B. Moldes

Los moldes son de arena de silicio aglomerada con resina. La arena es reutilizada en una proporción de 70/30 mezclada con arena nueva en la superficie de contacto con el acero y 100% reciclada en el relleno del molde. Para una mejor terminación y la reducción del riesgo de desprendimiento de la arena, las superficie de los moldes se pintan con pintura a base de silicato de circonio. Esta brinda una mejor calidad superficial del bruto de colada y evita que el acero penetre en el molde a través de la porosidad de la arena. Los moldes se secan por completo en estufas, aumentando la resistencia del mismo y evitando que remanentes de agua se vaporicen y rompan el molde o generen defectos durante la colada. La adición de resina como aglomerante aporta facilidad para desmoldar, mayor exactitud en las dimensiones y en los detalles geométricos, reduciendo costos de limpieza y postproceso. También ayuda a disminuir los tiempos de fraguado, brinda mayor resistencia y genera atmósferas reductoras en el molde que disminuyen el riesgo de porosidad.

Al momento de verter el acero dentro del molde, el mismo se calienta haciendo reaccionar el material. Esto tiene como efecto una degradación de la arena que se manifiesta como formaciones de silicatos de hierro de bajo punto de fusión, rotura de granos cercanos a la superficie, pérdida de fuerza aglomerante y sinterización del material granulado fino. Una vez terminada la colada, se separa la arena degradada y se reserva el resto para su reutilización.

Dentro del molde y durante el proceso de colada se pueden dar varios defectos derivados del material de moldeo y de sus condiciones. Entre ellos se destacan por su mayor relevancia las penetraciones, desprendimientos y adherencias. Las penetraciones se dan cuando el acero se mete en los poros del molde, generalmente en piezas grandes, resultando en un trabajo intensivo de limpieza y acabado. Como se mencionó previamente, las pinturas ayudan a evitar estos defectos. Por otro lado, los desprendimientos dan lugar a incrustaciones de arena en las piezas, los cuales son causados principalmente por cambios bruscos de volumen debidos a dilatación térmica del molde. Las adherencias consisten en material del molde que reacciona en la superficie del metal y son luego muy difíciles de separar. Las reacciones dependen fundamentalmente de la temperatura, presión y tiempo de contacto.

En las figuras a continuación se muestra el proceso de producción y armado de un molde de arena de sílice, con aglomerante de resina y pintura a base de circonio. El proceso comienza con el ensamblado del molde en cajón de madera (Figura 4); siguiendo con la colocación de la arena nueva mezclada con arena reciclada y resina aglomerante (Figura 5); revestimiento de pintura a base de circonio para mejorar la terminación superficial de la pieza y evitar defectos de colada (Figura 6); y finalmente secado, ensamblado y revisión del molde final (Figura 7).

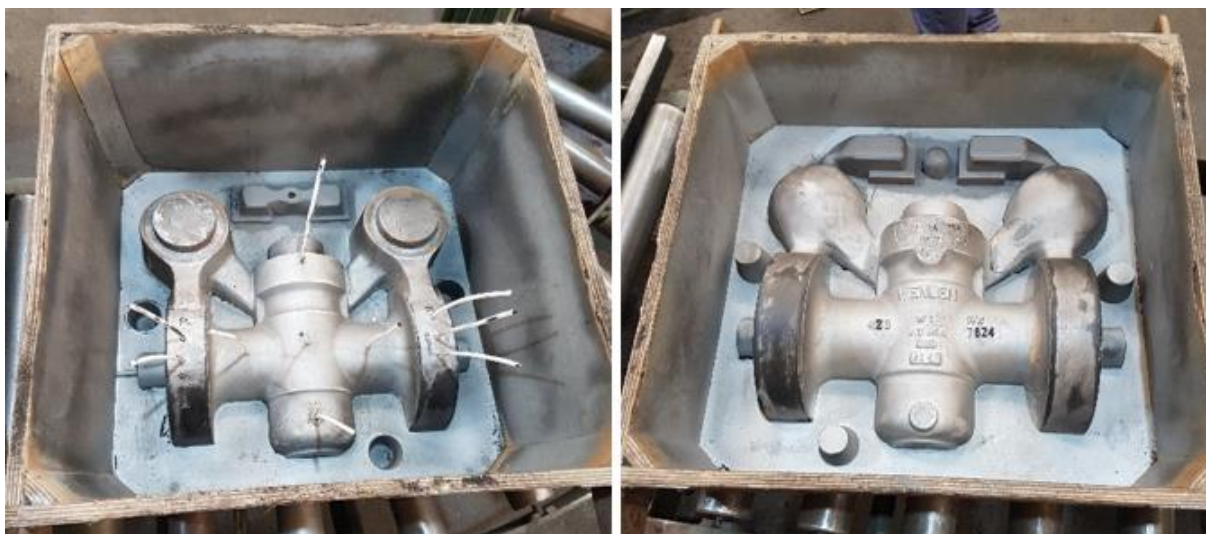


Figura 4. Modelos de pieza para molde de arena en cajón de madera



Figura 5. Negativos impresos en arena de silicio con aglomerante de resina



Figura 6. Superficie interior de molde de arena con revestimiento de pintura a base de circonio



Figura 7. Molde ensamblado, secado y revisado, listo para ser llenado

C. Técnica de colada y solidificación

En el acero moldeado, existe una fuerte tendencia a la formación de rechupes causados por la contracción del material durante el enfriamiento. Esta contracción se da en estado líquido, durante la solidificación y en estado sólido. En estado líquido el único efecto a tener en cuenta es la disminución del nivel de acero en las mazarotas. De mayor importancia es el efecto durante la solidificación, donde se forman los rechupes. Para evitar esto, la solidificación del acero debe ser dirigida de forma tal que el líquido remanente pueda llenar los huecos dentro de la pieza, dejando los rechupes únicamente en las mazarotas. Finalmente, en estado sólido el foco se debe poner sobre el fenómeno de agrietamiento en caliente.

Durante la colada, el acero entra en el molde y se comienza a solidificar en forma de dendritas con la misma orientación, dirigidas hacia las zonas más calientes del molde. La velocidad de avance de la solidificación es función del calor evacuado por el molde. Mientras ocurre este avance, el acero líquido debe entrar en los espacios interdendríticos para evitar la formación de microrrechupes. Si el acero no se encuentra lo suficientemente líquido como para fluir libremente, esto no ocurre. La formación de microrrechupes depende de varios factores, principalmente la distancia entre las curvas de líquidos y sólidos en el diagrama de equilibrio del acero. Este fenómeno se ve influenciado por la composición y, en particular, por el contenido de carbono del mismo. Asimismo si el gradiente de temperatura dentro de la pieza es grande, favorece la solidificación dirigida y disminuye la tendencia de microrrechupes.

Para lograr una solidificación dirigida, se diseñan los moldes de manera tal que permitan un flujo continuo de líquido durante el llenado, generando un gradiente de temperaturas favorable con las zonas más calientes ubicadas en las mazarotas. De esta manera, se busca generar una solidificación que avance desde las zonas más alejadas a las mazarotas y hacia ellas, localizando allí la pérdida de volumen y evitando los rechupes en el interior de la pieza. Para conseguir esto, se construyen secciones crecientes con refuerzos en la dirección de solidificación deseada y se ubican enfriadores en las zonas más estrechas. Los enfriadores se utilizan también para asegurar una solidificación rápida en zonas donde no se admiten rechupes. En contraste, se pueden utilizar materiales exotérmicos en zonas donde se busque retener líquido el mayor tiempo posible.

Las mazarotas se calculan individualmente para cada zona del molde en la que tienen efecto, aportando acero líquido hasta el final y absorbiendo las contracciones en volumen que suelen ser aproximadamente del 5%. Para evitar la pérdida de calor a través de las mismas, se suelen recubrir con materiales aislantes o exotérmicos. Se buscan siempre relaciones superficie/volumen mínimas, utilizando generalmente geometrías cilíndricas coronadas por semiesferas. Es muy importante el diseño y la eficiencia de las mazarotas ya que impacta directamente en el rendimiento metálico de la colada.

Se le llama sistema de colada al conjunto de entrada del molde por donde se vuelca el acero fundido. El mismo está compuesto por tres partes: el bebedero, los canales y las entradas propiamente dichas. El acero que es volcado desde la cuchara inicia su recorrido por el bebedero, donde el diseño del mismo debe permitir el flujo de acero sin arrastre de aire, arena o escoria. Luego, al pasar por los canales, el flujo disminuye su velocidad para evitar turbulencias que puedan causar arrastres y oxidación. Este recorrido debe hacerse en el menor tiempo posible para evitar el enfriamiento del acero antes de entrar al molde, procurando evitar arrastres, erosión de la arena, soldaduras en frío, agrietamientos en caliente por diferencia de temperatura, formación de óxidos y otros defectos. Para el sistema de colada se suele usar arena de alta calidad, frenos en el final del canal y un apelmazamiento y pulido especial de las paredes con el objetivo de conseguir superficies lo más lisas posible. También se colocan trampas de escoria entre el bebedero y los canales, generalmente

hechas con filtros o materiales porosos que permitan el flujo de acero al mismo tiempo que retienen la escoria no deseada.

D. Tratamientos térmicos

Según el tratamiento térmico que se le realice al acero, se obtendrán distintas microestructuras con microconstituyentes diferentes en cada caso, dependiendo de la composición del acero y la velocidad de enfriado. En cada paso del proceso se busca obtener alguna estructura particular, con sus propiedades mecánicas características. La estructura del acero como sale de colada es heterogénea, tanto en microestructura como en composición química a pequeña escala. Luego, con los tratamientos térmicos esta estructura cambia, buscando homogeneidad y mejora en las propiedades mecánicas hasta alcanzar lo requerido por la norma que regula la calidad del componente fabricado. Entre los distintos microconstituyentes se destacan los siguientes para el presente caso de estudio:

- **Ferrita:** Hierro casi puro que puede contener en solución pequeñas cantidades de Si, P u otras impurezas. Cristaliza en sistemas cúbicos de cuerpo centrado. Dureza de 90 Brinell, muy dúctil y maleable.
- **Cementita:** Carburo de hierro (Fe_3C). Es el constituyente más duro y frágil, con una dureza superior a 68 Rockwell-C.
- **Perlita:** Constituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita en forma de láminas paralelas separadas según la velocidad de enfriamiento. Perlita gruesa con separación entre láminas de $400\mu\text{m}$ y dureza de 200 Brinell, perlita normal de $350\mu\text{m}$ y 220 Brinell y fina de $250\mu\text{m}$ y 300 Brinell.
- **Austenita:** Cristales parecidos a los de ferrita pero de contornos más rectilíneos y con ángulos vivos. Dureza 300 Brinell. Blanda, muy dúctil y tenaz, gran resistencia al desgaste y el más denso de los aceros.
- **Martensita:** Constituyente típico de los aceros templados. Sus propiedades físicas varían según su composición, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido de C. Dureza 50 a 68 Rockwell-C. Se forma en agujas en zigzag con ángulos cercanos a los 60° . Cristaliza en sistema tetragonal que difiere muy poco del cubo de cuerpo centrado.

Para romper la estructura de colada, la cual no es deseada por su heterogeneidad microestructural, se realizan en las piezas distintos tratamientos térmicos o una combinación de varios. Para el estudio del presente trabajo se destacarán los tratamientos térmicos de normalizado, templado y revenido.

Normalizado: Consiste en un calentamiento a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, correspondiente a la temperatura donde comienza la transformación austenítica, seguido de un enfriamiento en aire tranquilo. Se deja al acero con características propias de su composición. Se eliminan tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano. El objetivo principal es romper la estructura de colada de la pieza, dejando una estructura uniforme y homogénea en composición.

Temple: Tiene como objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta a una temperatura ligeramente superior a la crítica superior y se enfría rápidamente en un medio conveniente. En el caso del acero en estudio, el temple se realiza en agua sin peligro de fisuración asegurando una velocidad de enfriado lo suficientemente rápida para obtener una estructura martensítica en la pieza.

Existen diversos factores que limitan o influyen en los resultados de los tratamientos térmicos, especialmente el templado. La velocidad de enfriamiento es la que controla y regula el fenómeno de temple. En las zonas donde la velocidad de enfriamiento es mayor que la velocidad crítica de temple, se obtendrá

martensita y se considerará templado el acero. Si la velocidad es menor, habrá imperfecciones en el templado. Los factores que intervienen pueden ser inherentes a la calidad del material y determinan la velocidad crítica de temple (tamaño de grano y composición, estructura microscópica y heterogeneidad de la austenita) o que determinan la velocidad de enfriamiento de los diferentes puntos de la pieza (forma y dimensiones, su estado superficial, conductividad térmica y medio empleado para el enfriamiento).

- **Composición:** En general, todos los elementos de aleación disminuyen la velocidad crítica de temple, siendo el Mn y Mo los que actúan con mayor intensidad, siguiendo por el Cr, Si y Ni.
- **Tamaño de grano:** A mayor tamaño de grano, menor templabilidad.
- **Tamaño de las piezas:** Se verá un gradiente de velocidad de enfriamiento a lo largo del espesor de la pieza. Esto puede llegar a resultar en piezas endurecidas completamente en la superficie pero no templadas en su centro.
- **Medio de enfriamiento:** Pueden ser al agua, en aceite, al aire o en baños de sal; cada uno variando la velocidad de enfriamiento según su poder de extracción de calor y la agitación que se le dé al baño. En medios líquidos se pasa por tres etapas con distintas velocidades de enfriamiento: Primero se forma una película de vapor en la superficie desprendiendo burbujas que disipa el calor en forma de radiación y convección, luego se acelera el enfriamiento cuando se comienza a desprender el vapor y finalmente cuando ya no se evapora el medio se enfría mediante conducción y convección nuevamente de manera lenta. El medio de temple no debe ser muy severo, ya que eso produciría gradientes muy elevados de temperatura y aumentaría el riesgo de fisuración de la pieza por tensiones térmicas.

Un aspecto clave para el templado es la templabilidad de la pieza. La dureza es la resistencia que opone el material a la penetración, la templabilidad viene determinada por la profundidad y su distribución de la dureza en el interior de la pieza. La templabilidad influye notablemente en los resultados cuando se ensayan piezas de bastante espesor, esto ocurre debido a que las propiedades mecánicas dependen principalmente de la microestructura del material. La dureza máxima viene determinada principalmente por el contenido de C, mientras que la templabilidad depende principalmente del contenido de aleantes (los más importantes son Mn, Mo y Ni). Se suele tomar como límite de zonas templadas y sin templar aquellas con 50% de martensita. El diámetro crítico es el diámetro del mayor redondo de ese acero en cuyo centro se consigue una estructura de 50% martensita templado en un medio teórico cuya absorción de calor fuese infinita. Se define como severidad de temple (H) a los valores del poder refrigerante de los diferentes medios. Para obtener una medida de estas propiedades resulta de gran utilidad el ensayo de Jominy.

Revenido: Se hace en piezas previamente templadas. Consiste en calentar hasta una temperatura inferior a la temperatura crítica, evitando que se vuelva a formar austenita. Se disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones generadas en el temple, se mejora la tenacidad y se ajusta la dureza o resistencia a la deseada.

Después del temple, los aceros quedan duros y frágiles. Esto se corrige con un revenido. Disminuye la dureza y resistencia, aumenta tenacidad y elimina tensiones internas. La resistencia mecánica disminuye progresivamente a medida que se eleva la temperatura del revenido, al mismo tiempo aumenta la ductilidad y la tenacidad. Con temperaturas elevadas también se consigue un gran aumento de resiliencia. En general, los aceros se contraen durante el revenido, donde los microconstituyentes se transforman a otros más estables, descomponiendo prácticamente toda la martensita obtenida en el temple. En los aceros Cr-Ni es muy común la fragilidad Krupp, que se da cuando el acero permanece durante bastante tiempo en la zona de temperaturas entre 450 y 550 °C. No se conocen claramente las causas por lo que se emplean ensayos de choque para determinar la existencia e importancia de esta fragilidad. A más de 550°C la fragilidad se puede producir si el enfriamiento es muy lento. Para evitar este fenómeno resulta muy eficaz añadir Mo al acero.

E. Defectos en el acero moldeado

Existe una variedad de defectos comunes en procesos de producción de acero moldeado, cada uno con su origen, morfología e impacto particular sobre las propiedades del material. A continuación se detallarán los más comunes y de mayor relevancia para el trabajo.

Porosidad: Se atribuye a una reoxidación del acero durante la colada y recorrido por el molde, donde aumenta el contenido de oxígeno. Este luego reacciona con el FeO presente en el acero produciendo CO, que es insoluble en el hierro líquido y se desprende en forma de burbujas. Para controlar la cantidad y localización de las porosidades, es bueno tener en cuenta el régimen de flujo del acero líquido y la geometría de la pieza a moldear. Por otro lado, al final de la solidificación el hidrógeno y el nitrógeno segregan en estas burbujas al disminuir su solubilidad con la temperatura. Una práctica común para evitar el desprendimiento de gases durante la solidificación es agregar aluminio, silicato de calcio o algún otro desoxidante para “calmar” el acero. Existen también gases que quedan atrapados mecánicamente, por una salida deficiente del gas presente en el molde. También pueden quedar poros abiertos al exterior generados por alguna partícula que al descomponerse genere gas en la superficie. Secar y estufar el molde a 200°C ayuda a reducir la humedad y neutralizar la superficie del mismo, evitando este tipo de porosidades.

Agrietamiento en caliente: Durante la solidificación segregan inclusiones de bajo punto de fusión al borde de grano debilitando la coherencia entre ellos. Esto, junto con una geometría o molde desfavorable, impide la contracción libre del material. Existen varios factores que afectan el agrietamiento, entre ellos la composición del acero, temperatura y técnica de colada, gradiente de temperatura y condiciones de solidificación dentro del molde (“puntos calientes”), facilidad de contracción de la pieza, entre otros. Para evitar este fenómeno, se deben tomar medidas desde la fusión del acero, limitar el contenido de azufre y otras impurezas. En aceros con entre 0,4 y 0,5% de C se alcanza la tendencia máxima de agrietamiento. Calentando el molde se obtiene una temperatura más homogénea que disminuye el número y longitud de grietas. También, se pueden poner enfriadores en puntos críticos del molde, o paredes finas para piezas grandes y moldes de baja consistencia que permitan la libre contracción de la pieza.

Rotura Concoidal: Ocurre en aceros con excesivo contenido de N y Al que forman nitruros en borde de grano. Los nitruros bajan la resistencia a la flexión y la resiliencia. El fenómeno es mayor en piezas enfriadas lentamente y con cristales primarios de gran tamaño. El aspecto de la fractura es concoidal, de superficie ondulada gris plateado con cristales alargados. Los nitruros segregan en forma de placas, debilitando la coherencia entre cristales. Como solución a este tipo de defectos, se suele bajar el contenido de N por debajo del 0,01%, dosificar el aluminio de la desoxidación final según los niveles de N presentes y, principalmente, realizar tratamiento de temple y revenido.

Inclusiones no metálicas: Son producto de las reacciones de impurezas precipitadas en los bordes de grano. Tienen efecto sobre la resiliencia y el alargamiento, especialmente a bajas temperaturas. Es necesario suprimir la presencia de estos productos en piezas muy solicitadas mecánicamente. Las inclusiones no metálicas son insolubles en el acero, por lo que no se pueden tratar sino evitar que se formen en un principio. Para esto se procura disminuir el contenido de azufre (cuya cantidad afecta mucho a este fenómeno) durante el período de afino, efectuar una cuidadosa desoxidación previa del horno para reducir la necesidad de agregar aluminio en la desoxidación posterior y filtrar el acero al momento de colarlo, reteniendo escoria remanente en la cuchara y otras impurezas presentes en el acero.

Penetraciones: Es acero que se mete en los poros del molde. Trae como consecuencia un aumento en los trabajos de limpieza posterior a la solidificación y vaciado del molde. Se presenta principalmente en piezas grandes, donde las superficies están en contacto por mucho tiempo. Son difíciles de eliminar y elevan mucho el costo de limpieza y acabado. Se soluciona con finos de baja permeabilidad o pinturas de molde, así como también reduciendo en lo posible la temperatura del acero de colada.

Desprendimientos, darts y colas de rata: Consisten en incrustaciones de arena en las piezas. Las principales causas son los cambios bruscos de volumen por dilatación o shock térmicos que hacen desprender pedazos de material del molde.

Adherencias: Es material del molde que se pega a la pieza por reacciones en la superficie del metal. Este fenómeno se da debido a un proceso de escorificación entre la superficie del molde y la superficie oxidada del acero líquido. Es conveniente recubrir la superficie del molde con pintura a base de circonio o algún material inerte frente al acero líquido. También la temperatura, presión y el tiempo de contacto juegan un papel importante en estas reacciones.

4.2 Métodos de ensayo

En esta sección se describirán los métodos de ensayo, los cuales serán las herramientas fundamentales tanto para los trabajos de caracterización del material como para los análisis de influencia de aspectos geométricos y variantes de composición en las propiedades mecánicas y tecnológicas de las piezas.

A. Composición Química

Los ensayos de composición química son utilizados frecuentemente en el proceso de fabricación de aceros, especialmente después del agregado de aleantes al metal fundido. En este punto, para asegurar la composición química deseada de la colada de acero, se procede a tomar una muestra del horno en forma de disco o “chupetín”. El mismo se deja enfriar y solidificar, luego se pule y se lo introduce en el espectrómetro para su análisis. Durante el ensayo, la máquina genera tres chispas muy energéticas que producen una muy alta temperatura en un punto de la muestra. Esta descarga repentina y concentrada de energía excita los elementos presentes en la muestra, haciendo que cada uno emita radiación en su frecuencia característica. Luego, con un receptor óptico incorporado a la máquina de ensayos se detectan los picos de frecuencia e intensidad de las emisiones. Finalmente, este espectro detectado se compara con las emisiones características conocidas de cada elemento, haciendo posible la determinación del contenido de cada uno presente en la muestra. La precisión de este tipo de ensayos puede alcanzar el 0,05%, dependiendo de la sofisticación de los equipos, la calibración y la calidad de operación de los mismos.^[6]

Como alternativa a este proceso, el ensayo se puede realizar mediante el método de espectroscopía de dispersión de energía (EDS). Este ensayo es similar y funciona bajo los mismos principios físicos de la materia, con la salvedad de que la excitación de la muestra se realiza con un haz de electrones y la emisión resultante es captada por un receptor de rayos X. Para esto se requiere un microscopio de barrido electrónico (SEM) con posibilidad de realizar análisis de composición química con EDS. La calidad de este método en la identificación de elementos químicos es en principio mayor que la espectroscopía óptica y no se limita al análisis químico de la superficie de la muestra, sino que permite explorar la composición en profundidad. Sin embargo este es un método semicuantitativo, el cual presenta error significativo en cuanto a la composición de carbono en la muestra. Para la detección y cuantificación de este elemento resulta mejor el ensayo de espectroscopía óptica.

Para el presente trabajo, los ensayos de composición química se realizaron con un espectrómetro SPECTROMAX, propiedad de Microwen (ver Figura 8). El mismo cuenta con un sistema de excitación por chispa y un receptor óptico de detección de emisión. La máquina fue seteada para devolver resultados expresados en porcentajes máxicos. A modo de verificación comparativa, para algunas probetas se utilizó también un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) conectado a un microscopio electrónico de barrido

(SEM), propiedad del ITBA. La norma de aplicación utilizada para ensayos de composición química de aceros como los estudiados es la norma ASTM E415-21^[6]. Las calibraciones de los equipos fueron realizadas por laboratorios externos acreditados por el Organismo Argentino de Acreditación (OAA).



Figura 8. Espectrómetro marca SPECTROMAX utilizado para los ensayos de composición química. A la derecha se observa una muestra pulida y colocada en posición para su análisis.

B. Macrografía

Se le llama “Macrografía” a la inspección visual, con o sin ayuda de lupa estereoscópica, de muestras de material. Esto se realiza principalmente como un estudio previo a la metalografía de la pieza (ver inciso siguiente) para evaluar su integridad y la representatividad de la misma con respecto al material que se desea estudiar.

En el caso del estudio en cuestión, se inspeccionaron macroscópicamente todas las muestras durante el preparado de los distintos ensayos. Se estudiaron todas las superficies y planos de corte realizados en busca de imperfecciones y defectos de colada. En la Figura 9 se muestra un registro del estudio visual de probetas durante su preparación.



Figura 9. Probetas preparadas siendo inspeccionadas mediante un estudio macrográfico

C. Metalografía

La metalografía consiste en la preparación de muestras de materiales metálicos para su estudio microscópico, revelando estructuras y patrones en el orden de los micrómetros. Mediante el estudio de las microestructuras de los metales se pueden identificar distintos microconstituyentes (siendo los más comunes la ferrita, perlita y martensita), sus proporciones y distribuciones, proporcionando información acerca de las propiedades subyacentes del material y su historial térmico. Este ensayo es muy útil para la identificación y determinación de la efectividad de los tratamientos térmicos realizados a los metales.

La preparación de las muestras se realiza tomando una pequeña porción representativa del metal a estudiar, cortada evitando o minimizando cualquier transferencia de calor mediante el uso de una cortadora especial metalográfica. Luego se inserta la muestra en una pastilla de resina, facilitando así su manipulación. Esto se logra con la ayuda de una máquina inclusionadora que funde y solidifica resina alrededor de la muestra. La pastilla se pule con lijas de grano progresivo hasta obtener una superficie metálica plana y espejada. Esta superficie es luego atacada químicamente para revelar un contraste entre las zonas de mayor concentración de carbono y aquellas con fracción mayoritaria de hierro. Finalmente, se lleva la muestra a un microscopio óptico para observar las diferentes fases y estructuras reveladas en el metal. Las imágenes obtenidas son analizadas identificando directamente los microconstituyentes del metal o mediante comparación con metalografías publicadas en manuales con la finalidad de servir de referencia para este tipo de estudios. En estos manuales se describen las particularidades de distintos materiales y dentro de cada uno las distinciones según los tratamientos térmicos o químicos a los cuales fueron sometidos. Uno de los manuales más utilizados en este tipo de prácticas, y particularmente utilizado en la realización de el presente trabajo, es el manual de metalografías y microestructuras para metales de ASM^[7]. En la Figura 10 se muestran algunas partes y máquinas utilizadas en el proceso de preparación de muestras.



Figura 10. De izquierda a derecha: Corte de porción representativa de metal mediante cortadora metalográfica; Inclusionadora donde se inserta la muestra metálica en una pastilla de resina; Muestra pulida previo a ataque químico.

D. Dureza y Microdureza

La dureza de un material es una propiedad relativa a otro u otros materiales que muestra el grado de resistencia a ser rayado, penetrado o marcado que tiene uno respecto al otro. Para medir y cuantificar esto, las mediciones de dureza se realizan penetrando una muestra del material a estudiar con puntas de diferentes geometrías y materiales y midiendo la profundidad o dimensiones de la entalla (ya sea la diagonal

de una entalla tetragonal, el diámetro de una entalla circular o la profundidad, entre otras variantes). Existen varios métodos y escalas para medir esta propiedad, siendo cada uno de ellos diseñados para adaptar mejor la medición a distintos tipos de materiales y condiciones superficiales. Es por esto que resulta difícil encontrar equivalencias precisas entre métodos y se recurre muchas veces a fórmulas de conversión para la comparación indirecta y semicuantitativa de resultados.

Como caso particular para el estudio microscópico de la dureza se recurre al ensayo de Microdureza. El mismo es similar al ensayo convencional de dureza pero a escala microscópica, permitiendo medir la propiedad de distintos microconstituyentes de la muestra por separado pudiendo así comparar la dureza entre las fases. Para estos ensayos se recurre a un durómetro con microscopio óptico para ubicar la posición de la entalla a realizar.

Para el trabajo en cuestión se realizaron ambos ensayos y se adoptaron distintos métodos. Para Microdureza se utilizó el método Vickers con indentador tipo pirámide de diamante, con distintas cargas y escalas según la dureza estimada del microconstituyente a medir (HV1 y HV0,5). La calibración de los equipos se verificó antes de cada tanda de ensayos utilizando patrones de dureza estándares adecuados para cada método. Para la medición de la dureza macroscópica de las muestras se utilizaron los métodos Rockwell B, C y Brinell (HRB, HRC y HB respectivamente) con indentadores esféricos de distinto tamaño según el método. En particular, para acero fundido se recomienda utilizar el método Brinell con indentador de bola de diámetro grande debido a la heterogeneidad del material bruto de colada. Las máquinas utilizadas fueron un durómetro marca PETRI, propiedad del ITBA; un durómetro marca KING, propiedad de Microwen; y un micro durómetro, propiedad del ITBA. Se aplicaron las normas ASTM adecuadas para cada tipo de ensayo^{[8][9]}. A continuación, en la Figura 11 se muestran algunos de los equipos utilizados.



Figura 11. En las imágenes superiores se muestran algunas de las máquinas utilizadas para la medición de dureza; en las imágenes inferiores se muestran una lupa de medición y la indentación medida.

E. Tracción

El ensayo de tracción de un material permite medir la deformación del mismo al aplicar una fuerza conocida. Esto nos sirve para luego calcular propiedades tales como la tensión de fluencia, módulo de elasticidad, tensión, estricción, alargamiento a la rotura del material, entre otras. Para ensayar una muestra del material es necesario seguir una serie de parámetros específicos de carga y geometrías particulares de probeta que vienen delimitadas según norma^[10]. Las máquinas de ensayo de tracción son construidas generalmente con un cabezal fijo y otro móvil, los cuales traccionan de la muestra de material en una única dirección con velocidad controlada. La aplicación de la fuerza sobre la probeta es lenta, buscando un efecto cuasi estático en el material tensionado y unidireccional. La misma es medida mediante una celda de carga sensible a la fuerza aplicada por el cabezal, mientras que el desplazamiento es controlado por el sistema operativo de la máquina. Si bien el desplazamiento del cabezal debería ser idealmente igual a la deformación del material en esa dirección, el agarre de la probeta resulta imperfecto y la geometría de la zona de fijación de la probeta puede inducir mediciones incorrectas. Es por esto que para la medición más precisa de la deformación del material se recurre a extensómetros fijados a la zona central de la pieza, la cual debe ser fabricada bajo tolerancias más estrictas que el resto de la probeta. Existen varias geometrías aptas para el ensayo, las más comunes son planas con forma de “hueso” y las adoptadas para este trabajo fueron las de aspecto cilíndrico como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Probetas de tracción cilíndricas luego de ser ensayadas.

Para la fabricación de las probetas se siguieron las normas internas de la empresa, basadas en la norma ASTM E8 de uso común^[10]. Se tomaron muestras de material representativo para cada variante de producto y se tornearon mediante un torno CNC marca Haas, propiedad del ITBA, para asegurar la precisión y repetibilidad de la geometría requerida. Luego, se llevaron las probetas fabricadas a la empresa para su ensayo en una máquina de tracción marca SHIMADZU. Los ensayos estuvieron a cargo de personal de la empresa, siguiendo las metodologías y estándares de la misma. En la Figura 13 se muestran algunas fotos de las máquinas utilizadas, tanto para la fabricación como para el ensayo en sí.



Figura 13. Torno CNC utilizado para la fabricación de probetas (izquierda) y máquina de ensayos de tracción (derecha).

Luego del ensayo, se analizan los datos de deformación y carga asociada para calcular la tensión y graficar la curva de tensión-deformación del material. A raíz de esto, se pueden identificar otras propiedades de interés como la tensión a la que el material pasa de deformarse de manera cuasi elástica a plástica (tensión de fluencia) o la tensión última a la cual el material se rompe definitivamente. Se considera válido el ensayo si se siguen las especificaciones de ensayo que delimita la norma aplicada (velocidad del cabezal), si los agarres de la probeta no sufren desgarros o movimientos durante la tracción y si la fractura ocurre en la zona calibrada central de la probeta. De otra manera el ensayo no es válido y los datos registrados durante el mismo no tienen validez para calcular ninguna de las propiedades buscadas.

F. Observación de superficie de fractura

Una vez realizado un ensayo de tracción sobre una probeta, las superficies separadas por la fractura pueden ser estudiadas. En esta observación se pueden obtener datos acerca del mecanismo de fractura mediante el cual la pieza se rompió y sumar información del comportamiento de la misma bajo tensiones límite. Reconociendo la morfología de la superficie de fractura se puede identificar si la fractura fue dúctil o frágil, si la fatiga o algún defecto en el material fueron causas relevantes de la fractura y demás indicios de otras propiedades del material como puede ser su tenacidad, resistencia y ductilidad. También juega un rol fundamental en el mecanismo de fractura la microestructura del material, correlacionando lo observado bajo microscopio en metalografías con la superficie expuesta luego del ensayo de tracción.

La observación puede realizarse con lupa estereoscópica de bajo aumento (x2). Las imágenes obtenidas se analizan luego reconociendo patrones característicos o bien realizando comparaciones entre imágenes de superficies que han sufrido mecanismos de falla conocidos. Para esto, existe bibliografía catalogando las diferentes morfologías, explicando las causas y correlacionando los mecanismos con distintas propiedades subyacentes de los materiales. Para los ensayos realizados en ITBA y Microwen, se utilizó bibliografía provista tanto por la cátedra como por la empresa^{[11][12]} para la comparación de las imágenes obtenidas y su interpretación.

G. Templabilidad - Jominy

El ensayo de templabilidad, comúnmente llamado “Ensayo de Jominy” en nombre a su autor, busca evaluar la capacidad de un acero de endurecerse a distintas velocidades de enfriamiento durante un tratamiento térmico. Esta propiedad de los aceros es muy estudiada y aplicada en la industria ya que mediante los tratamientos térmicos (en este caso particular, el templeado) se logra endurecer por completo

o parcialmente un material y/o su superficie, brindando una mayor resistencia, dureza superficial y resistencia a la fatiga debido a la dificultad de nuclear fisuras en la superficie tratada. Esto dota al material de distintas características que lo hacen favorable en un rango muy amplio de aplicaciones.

Para realizar el ensayo se debe tomar una muestra del material a evaluar, mecanizarlo según lo indicado por norma^[13] y realizarle un tratamiento térmico de normalizado. Luego se procede a calentar la pieza y mantenerla en un horno de temple a la temperatura y durante un tiempo indicado por norma, con el objetivo de austenizar por completo la probeta. Una vez alcanzado este punto se debe enfriar la pieza rápidamente desde un extremo mediante un chorro de agua a temperatura ambiente, donde el flujo también es indicado. Esta acción provoca que el material se enfríe a diferentes velocidades a lo largo de la probeta, a medida que nos alejamos del extremo en contacto con el agua. Una vez finalizado el ensayo, la probeta es cortada o rectificada a lo largo para exponer material del centro de la misma para obtener una superficie plana y evitar efectos de borde en la medición de la dureza. Finalmente se mide la dureza en escala Rockwell C en varios puntos a modo de relevar una curva de durezas en función de la distancia al borde expuesto al chorro. De esta curva se puede estimar el espesor máximo de pieza templable, o por lo menos el espesor máximo al cual se obtendrá la dureza deseada. La templabilidad de los aceros es medida mediante este tipo de ensayos y asegurada por los fabricantes. La misma depende fuertemente de los aleantes utilizados y la dureza alcanzable del porcentaje de Carbono presente en el acero.

Para la realización del ensayo en las piezas estudiadas se solicitó una muestra de material a Microwen, se mecanizó en el taller del ITBA y se ensayo utilizando una máquina diseñada y construida por alumnos. Parte del presente trabajo involucró la finalización del ensamblado, puesta a punto y prueba de la misma. En el proceso se utilizaron máquinas herramienta de corte por hilo, corte por chorro de agua, herramientas manuales y manufactura aditiva. En la Figura 14 se muestran algunas imágenes del proceso.



Figura 14. Distintas etapas del proceso de fabricación de la máquina de Jominy utilizada para los ensayos de templabilidad.

Para la medición de dureza las probetas fueron montadas en un dispositivo fabricado también por alumnos, propiedad del ITBA, el cual facilita el distanciamiento entre puntos de medición. En la Figura 15 se muestran imágenes del proceso de ensayo de una muestra, desde el calentamiento en horno, el enfriado de la pieza montada en la máquina de Jominy fabricada y el posicionamiento de la misma en el dispositivo adaptado para el relevo de la curva de dureza.

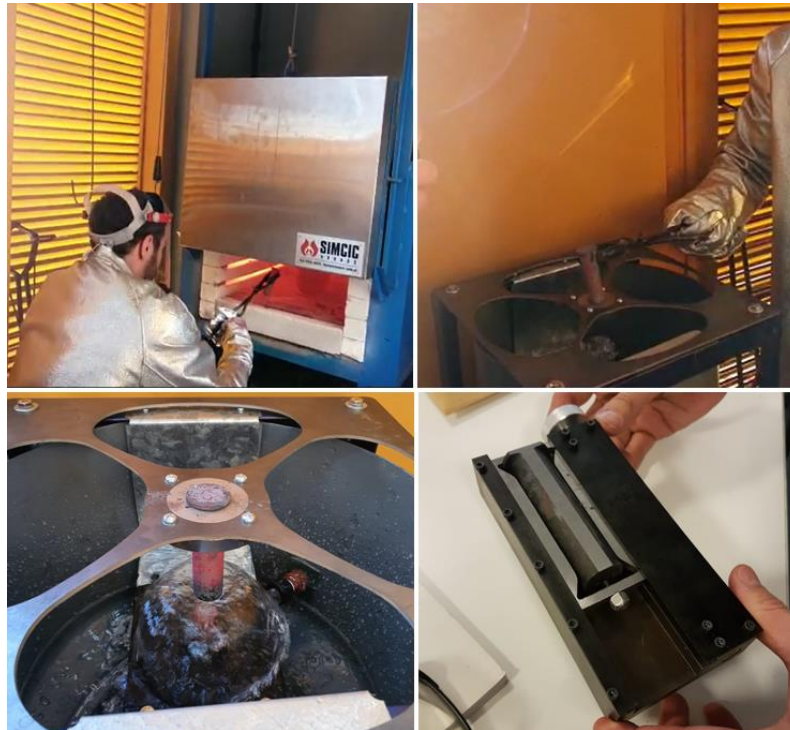


Figura 15. Distintas etapas del ensayo de Jominy realizado.

H. Impacto – Charpy

El ensayo de impacto se utiliza para medir la tenacidad de un material, es decir, la capacidad del mismo para absorber energía sin romperse. También se utiliza para encontrar el punto de transición dúctil-frágil, el cual depende de la temperatura del material al momento de someterlo a una carga repentina. Si bien no todos los materiales presentan este punto distintivo, la mayoría de los aceros colados lo hace y esto delimita un rango de temperaturas de operación apto para el uso de piezas de este material.

En cuanto a la metodología del ensayo, las probetas son fabricadas con geometría rectangular según especificaciones normadas^[14], con tolerancias estrictas en cuanto a las dimensiones y rugosidad superficial. También se les realiza una entalla calibrada para asegurar la fractura de la muestra en esa ubicación. Antes del impacto, las probetas son enfriadas con nitrógeno líquido a temperaturas de entre -20°C y -40°C . Luego, se montan en la máquina de ensayos de Charpy, la cual consiste en un péndulo con una masa en el extremo y una base donde se sujeta la muestra. El mismo se eleva, ganando así energía potencial, y se suelta para que impacte en la probeta rompiéndola y registrando la diferencia de energía resultante. Esta diferencia de energía corresponde a la cantidad absorbida por el material durante el impacto y hasta la rotura del material.

Para el trabajo en cuestión la realización de los ensayos de impacto quedó bajo responsabilidad de Microwen, ya que su proceso productivo requiere la validación del lote fabricado mediante este ensayo. Se realizó en un laboratorio externo, el cual reportó a la empresa los resultados de energía absorbida y valor de resiliencia para cada probeta. En general, una rotura frágil de la probeta indica menor tenacidad mientras que una rotura dúctil (o incluso la no rotura de la muestra) indica buena tenacidad y resiliencia.

5. Desarrollo y resultados

El trabajo consistió en dos etapas bien definidas: La caracterización del material proporcionado en cada etapa de fabricación hasta alcanzar las especificaciones finales requeridas por norma^[4]; y un posterior análisis de una aleación de prueba con la intención de caracterizar sus propiedades y la variación de las mismas dependiendo del espesor de la pieza fabricada. Para esto, Microwen proporcionó muestras de los materiales colados y tratados térmicamente para cada etapa de fabricación y de interés. Se coordinó un plan de trabajo con la empresa detallando las muestras a analizar y los ensayos a realizar sobre las mismas. Una vez delimitado el plan, la empresa fabricó las muestras y las entregó para su preparación y análisis. Los ensayos fueron realizados tanto en el laboratorio de materiales del ITBA como en el laboratorio de calidad de Microwen. Con el trabajo conjunto entre empresa y universidad, sumado a la ayuda de varios colaboradores, se logró caracterizar cada etapa de fabricación del acero aleado tipo 60K bajo norma API 6A y se estudió el comportamiento de la aleación de prueba (denominada “Grado C”) en comparación a la original (denominada “Grado A”). A continuación, se muestran los ensayos realizados y un resumen de resultados obtenidos en cada etapa. En el anexo de este documento se pueden encontrar los informes de ensayos completos.

5.1 Caracterización de acero API 60K Grado A en cada etapa de fabricación

Las muestras fueron extraídas de diferentes etapas del proceso de colada y tratamiento térmico de una fundición de acero de baja aleación “60K” según norma API 6A. Corresponden a un acero hipoeutectoide de baja aleación. Las probetas fueron extraídas en las siguientes etapas del proceso de fabricación:

P1: Bruto de colada

P2: Normalizado

P3: Normalizado y templado

P4: Normalizado, templado y revenido

Los probeteros utilizados para la fabricación de las muestras son del tipo doble lomo. Se realizaron cortes sobre los mismos al momento de separación de cada muestra, obteniendo cuatro lomos como se muestra en la Figura 16, cada uno extraído en la etapa del proceso mencionadas anteriormente.



Figura 16. Muestras de material obtenidas a partir de probeteros tipo "doble lomo".

A. Composición Química

Se analizó la composición química de una muestra extraída directamente del horno, antes de iniciar la colada. Los resultados se muestran en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*Tabla 1.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,306	0,6	1,33	0,013	0,0047	0,234	0,154	0,024

Tabla 1. Composición química del lote de fabricación estudiado, en % másico.

B. Macrografía

Se pulieron y observaron las muestras, encontrando únicamente un poro en el seno del material de la probeta P4 como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Probeta P4 con poro visible.

C. Metalografía

Se prepararon y observaron las muestras en un microscopio óptico con distintos aumentos: x50, x100, x200 y x500. A continuación en las Figura 18-21 se muestran algunas de las imágenes obtenidas para cada muestra.

P1:

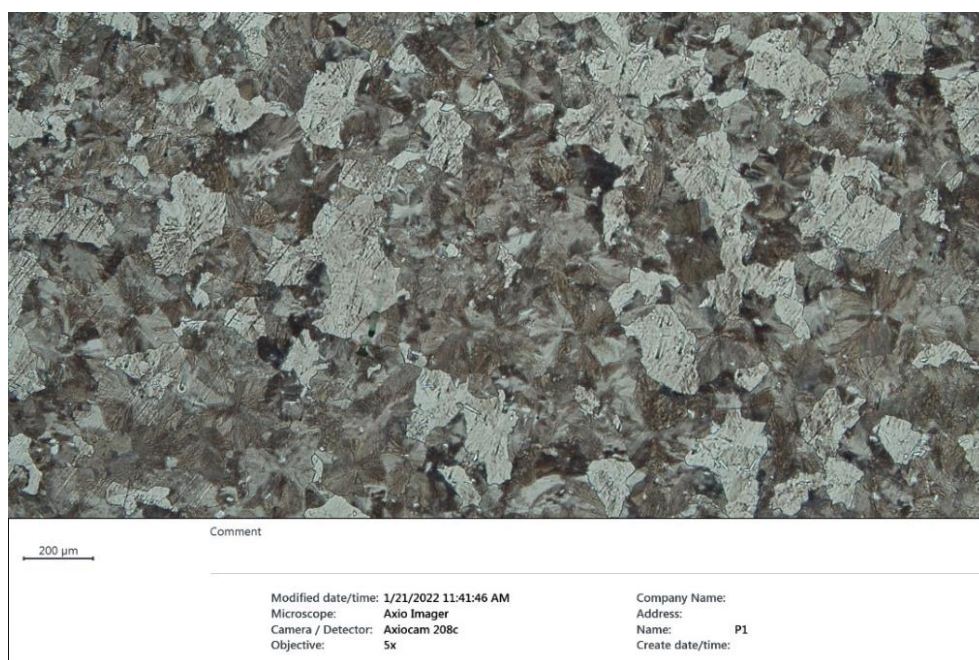


Figura 18. Metalografía de muestra P1, aumento x50.

P2:

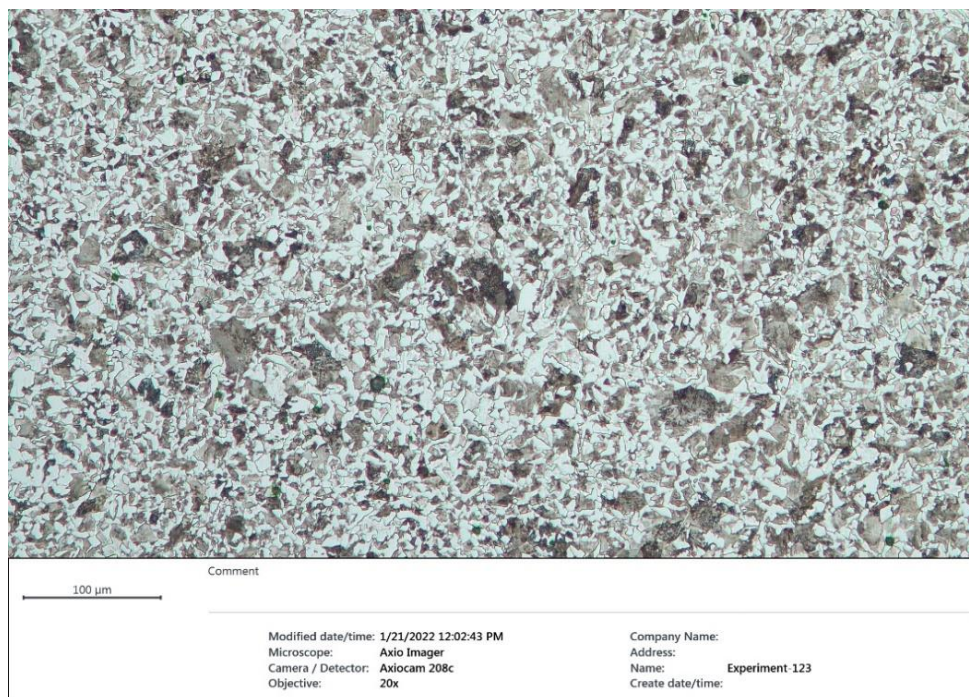


Figura 19. Metalografía de muestra P2, aumento x200.

P3:



Figura 20. Metalografía de muestra P3, aumento x500.

P4:

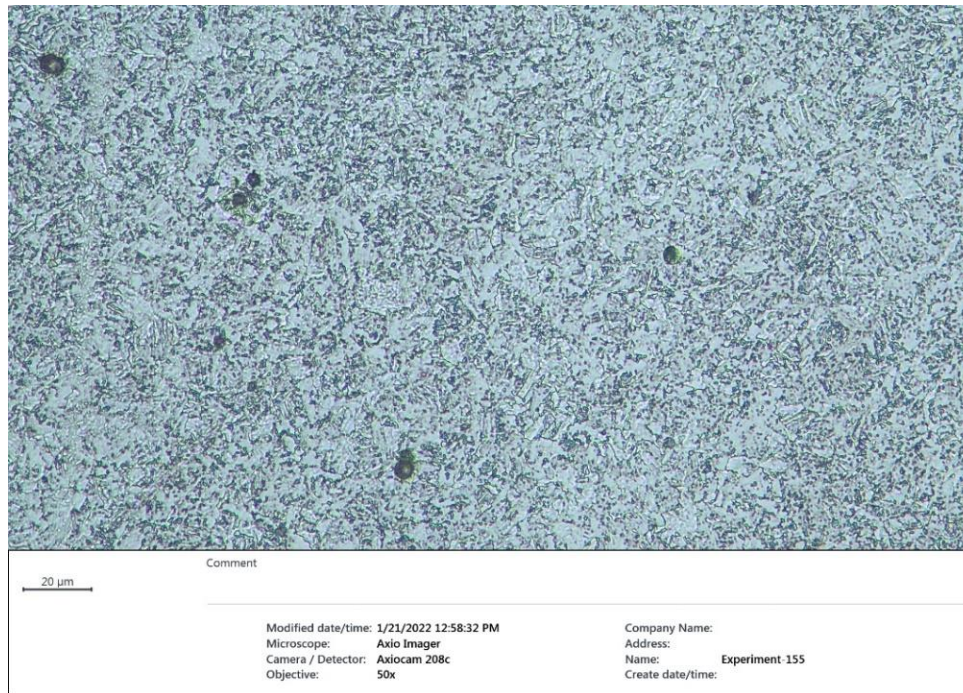


Figura 21. Metalografía de muestra P4, aumento x500.

A continuación, en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para el recuento de contenido inclusionario sobre las muestras presentadas en la Figura 22. No se encuentra el origen de la referencia..

Probeta N°	Sulfuros (A)		Aluminatos (B)		Silicatos (C)		Óxidos Globulares (D)	
	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa
P1	1	0,5	0	0	0,5	1	1,5	1,5
P2	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	2	2
P3	0	0	0,5	0,5	0,5	1	2	2
P4	0	0,5	0,5	0,5	0	0,5	3	2,5

Tabla 2. Contenido inclusionario para cada probeta.

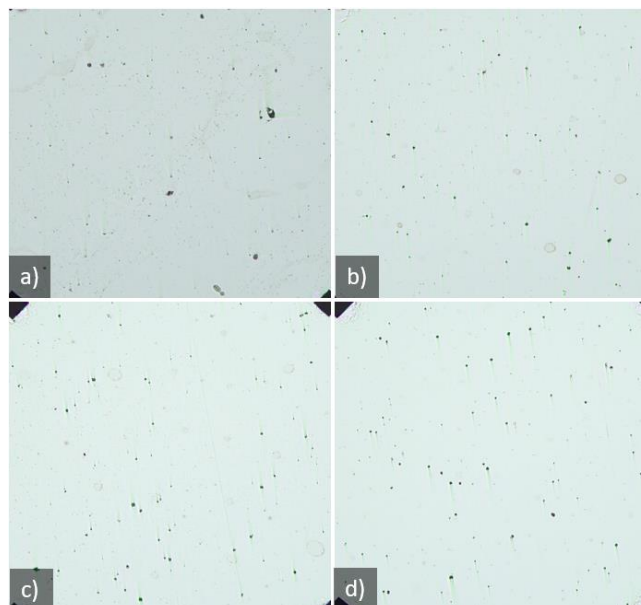


Figura 22. Zonas de análisis de contenido inclusionario, siendo (a) P1, (b) P2, (c) P3 y (d) P4.

D. Dureza y Microdureza

En la Tabla 3 se muestran los valores de dureza Brinell obtenidos para mediciones sobre la superficie de las probetas. Estas mediciones se realizaron con un durómetro KING, propiedad de Microwen.

Probeta	Escala	Número de Entalla			Promedio	Desvío
		1	2	3		
1	Brinell	255	248	255	252,7	4,041
2	Brinell	229	217	212	219,3	8,737
3	Brinell	363	341	341	348,3	12,702
4	Brinell	229	223	223	225,0	3,464

Tabla 3. Dureza Brinell obtenida para cada probeta.

Las microdurezas obtenidas en las distintas zonas de las piezas varían según la composición y microconstituyentes abarcados. En la siguiente Tabla 4 se detallan las probetas, entallas y zonas para los resultados obtenidos. Los valores obtenidos confirman los microconstituyentes observados en las metalografías, ya que se condicen con las durezas obtenidas para cada uno de ellos.

N° de entalla	Probeta	Microconstituyente/ zona	Valor	Escala	%error
1	P1	Zona descarburada (ferrita)	218,7	HV1	4
2	P1	Zona desc. + 0,5 mm	228,2	HV1	4
3	P1	Zona desc. + 1 mm	252,3	HV1	4
4	P1	Zona desc. + 1,5 mm	282,8	HV1	4
5	P1	Perlita gruesa	265,6	HV1	4
6	P1	Perlita fina	290,3	HV1	4
7	P1	Ferrita	259,0	HV1	4
8	P1	Bainita Superior	270,4	HV1	4
9	P2	Perlita gruesa + Ferrita	222,2	HV0,5	5
10	P2	Estructura general (norm.)	213,0	HV0,5	5
11	P2	Zona descarburada (ferrita)	174,4	HV0,5	5
12	P2	Zona desc. + 1 mm	229,1	HV0,5	5
13	P3	Martensita	449,8	HV0,5	5
14	P3	Zona descarburada (ferrita)	210,6	HV0,5	5
15	P3	Zona desc. + 0,5 mm	308,7	HV0,5	5
16	P3	Zona desc. + 1 mm	406,0	HV0,5	5
17	P4	Zona descarburada (ferrita)	217,0	HV0,5	5
18	P4	Zona desc. + 0,5 mm	229,8	HV0,5	5
19	P4	Zona desc. + 1 mm	239,9	HV0,5	5
20	P4	Martensita revenida	250,5	HV0,5	5

Tabla 4. Microdureza de los distintos microconstituyentes y zonas particulares encontrados en cada probeta.

E. Tracción

Se tornearon las probetas de geometría cilíndrica con zona calibrada de 50 mm de largo y 12,5 mm de diámetro. Para ello, se utilizó un torno CNC Haas provisto por el taller del ITBA. Las mismas se fabricaron y ensayaron siguiendo las especificaciones y parámetros internos de Microwen, en una máquina de ensayos de tracción SHIMADZU UH-300kNI, propiedad de la empresa. Todas las probetas rompieron en la zona calibrada. En la Figura 23 se muestra la comparación entre probetas de los valores obtenidos:

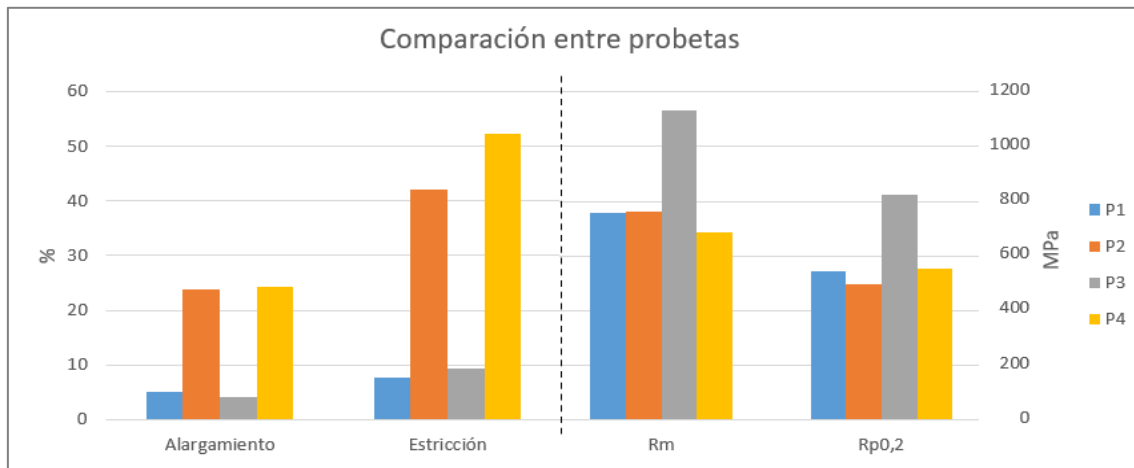


Figura 23. Comparación entre probetas de valores obtenidos durante los ensayos de tracción.

F. Observación de Superficie de Fractura

Una vez traccionadas las probetas, se observaron las superficies de fractura de cada una para identificar los mecanismos de rotura. Para esto, se utilizó una lupa estereoscópica. A continuación en la Figura 24 se muestran las imágenes obtenidas para cada probeta y la descripción del mecanismo de falla correspondiente. Todas las imágenes tienen un aumento x2.

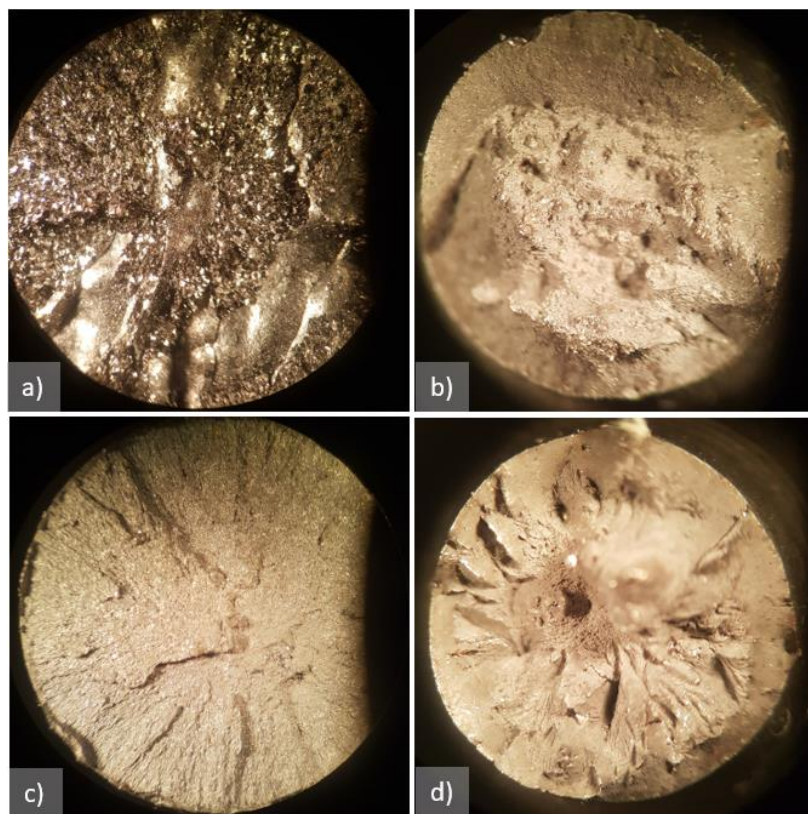


Figura 24. Imágenes obtenidas durante la observación de superficie de fractura para cada probeta, siendo (a) P1, (b) P2, (c) P3 y (d) P4.

- (a) Fractura frágil generalizada con algunas zonas dúctiles localizadas.
- (b) Fractura dúctil con forma tipo copa-cono, con zonas visibles de nucleación de discontinuidades.
- (c) Fractura completamente frágil con fisuras en dirección radial y planos de clivaje sobre la superficie.
- (d) Fractura dúctil generalizada con algunos picos de secciones remanentes frágiles posteriores a la deformación.

G. Composición de inclusiones con SEM-EDS

Se colocaron las probetas en un microscopio electrónico de barrido (SEM), propiedad del ITBA, para identificar inclusiones y obtener su composición con un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) conectado al mismo. A partir del análisis de distintas zonas de cada probeta se obtuvieron varios resultados, algunos similares entre sí. En las Figura 25-28 se detallan resultados destacables entre los distintos sitios de análisis.

P1:

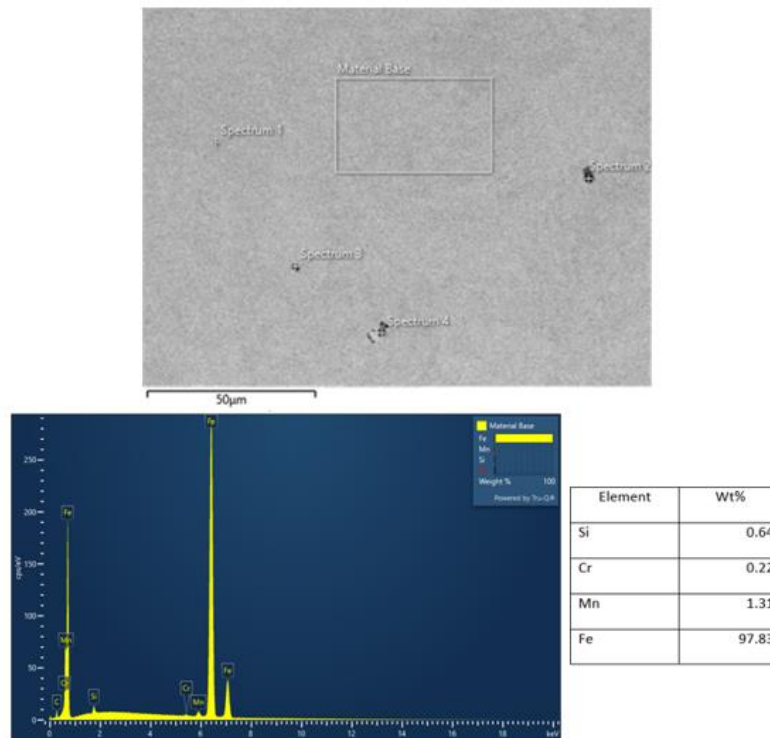


Figura 25. Imagen de SEM y resultados de EDS del material base de P1, también se observan algunas inclusiones no metálicas.

P2:

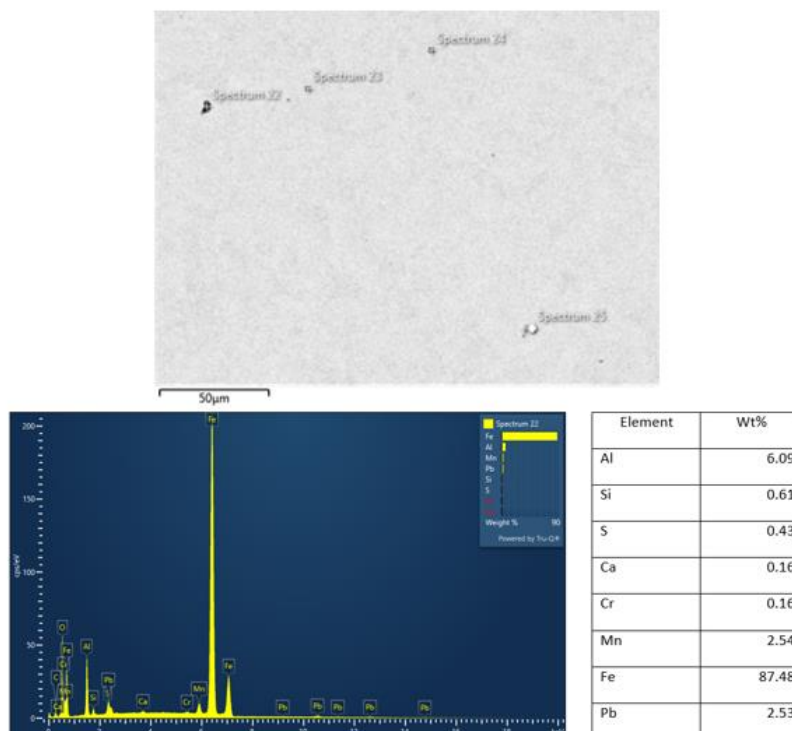


Figura 26. Imagen de SEM del material base de P2 y resultados de EDS de una inclusión no metálicas.

P3:

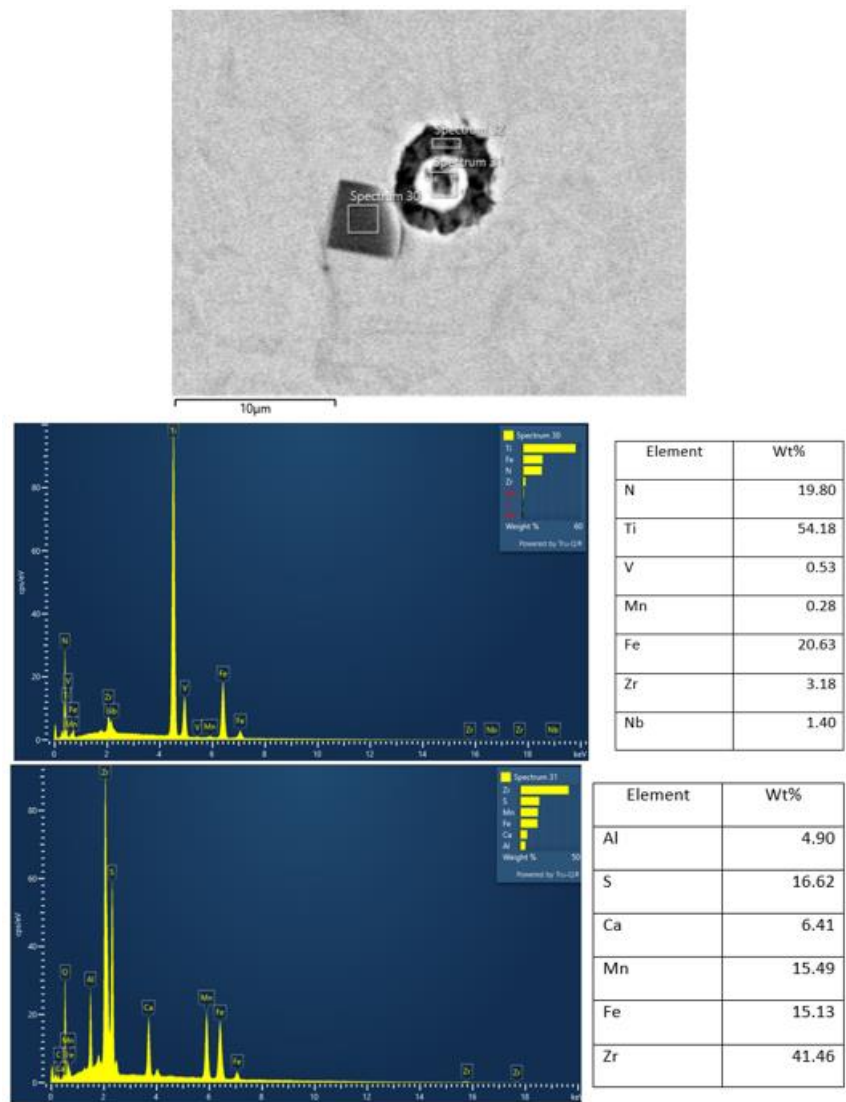


Figura 27. Imagen de SEM del material base de P3 y resultados de EDS de dos inclusiones no metálicas.

P4:

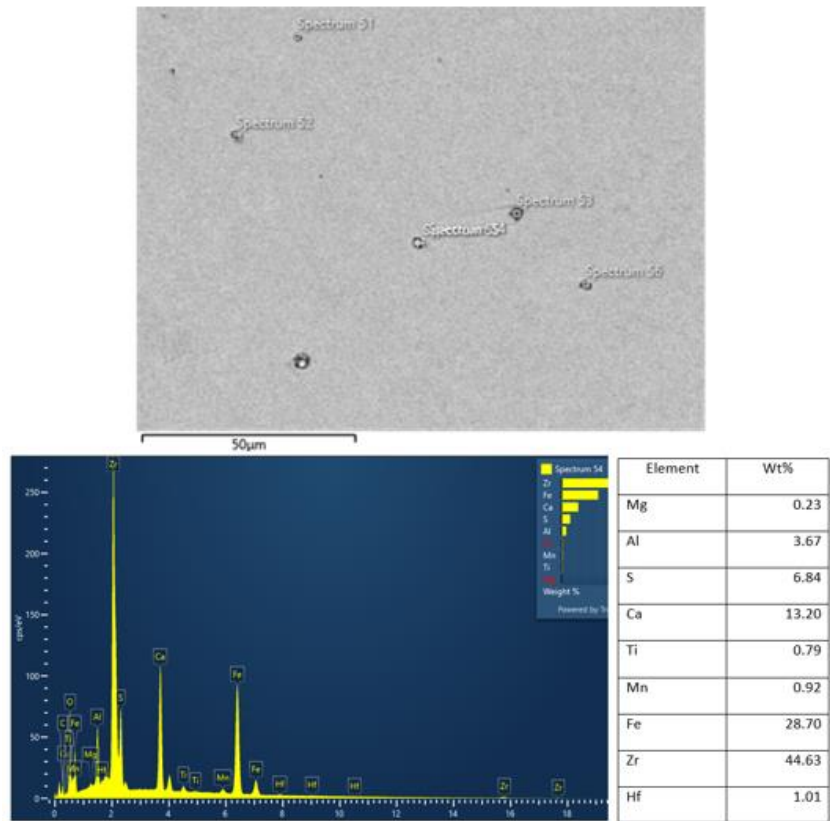


Figura 28. Imagen de SEM del material base de P4 y resultados de EDS de una inclusión no metálica.

5.2 Análisis de aleación de prueba API 60K Grado C y estudio de la variación de las propiedades con el espesor

Las muestras fueron extraídas de dos coladas de fundición de acero de baja aleación “60K” según norma API 6A^[4], una con aleantes típicos de producción y otra con modificaciones en las cantidades de Cr, Ni y Mo correspondientes a un acero hipoeutectoide de baja aleación. Las probetas obtenidas fueron coladas en probeteros tipo doble lomo y tipo Keel Block (ver Figura 29) de radio 42 y 60 mm con el objetivo de evaluar la influencia de los espesores de piezas en las propiedades mecánicas. Se sacaron muestras de acero colado normalizado y acero colado templado y revenido, contrastándolos con el producto bruto de colada.

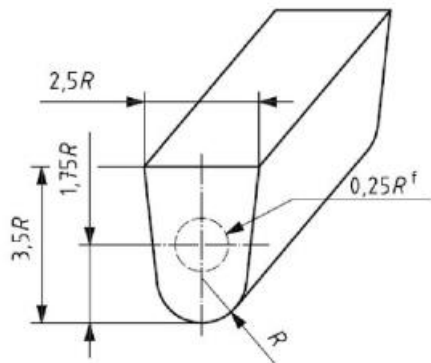


Figura 29. Dimensiones características del probetero tipo Keel Block utilizado para la extracción de muestras.

En la Tabla 5 se detallan los datos de las muestras, probeteros y coladas obtenidas para los ensayos. Los tratamientos térmicos se referencian como: AC (As Cast o bruto de colada), N (Normalizado), NTR (Normalizado, Templado y Revenido).

Tipo de probetero	Colada N°	Aleación	Muestra N°	Tratamiento Térmico
Doble lomo ASTM	MW 7877	60K Gr.A	5	AC
Doble lomo ASTM	MW 7877	60K Gr.A	6	N
			7	NTR
Keel Block R42	MW 7877	60K Gr.A	8	AC
Keel Block R42	MW 7877	60K Gr.A	9	N
Keel Block R42	MW 7877	60K Gr.A	10	NTR
Keel Block R60	MW 7877	60K Gr.A	11	AC
Keel Block R60	MW 7877	60K Gr.A	12	N
Keel Block R60	MW 7877	60K Gr.A	13	NTR
Doble lomo ASTM	MW 7925	60K Gr.C	14	AC
Doble lomo ASTM	MW 7925	60K Gr.C	16	N
			17	NTR
Keel Block R42	MW 7925	60K Gr.C	18	AC
Keel Block R42	MW 7925	60K Gr.C	19	N
Keel Block R42	MW 7925	60K Gr.C	20	NTR
Keel Block R60	MW 7925	60K Gr.C	21	AC
Keel Block R60	MW 7925	60K Gr.C	22	N
Keel Block R60	MW 7925	60K Gr.C	23	NTR

Tabla 5. Datos de las muestras, probeteros y coladas obtenidas para los ensayos.

A. Composición Química

Se analizó la composición química de ambas coladas, promediando los valores entre muestras de la misma colada extraídas de varios probeteros. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Colada	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
Gr. A	0,32	0,66	1,36	0,020	0,002	0,06	0,08	0,007	0,04
Gr. C	0,31	0,79	0,84	0,018	0,001	0,80	0,48	0,19	0,04

Tabla 6. Composición química de las distintas coladas, en % másico. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

B. Macrografía

Se cortaron y observaron las muestras. No se encontraron evidencias de poros o defectos de colada en ningún plano de corte en ninguna de las mismas.

C. Metalografía

Se prepararon y observaron las muestras en un microscopio óptico con distintos aumentos: x50, x100, x200 y x500. A continuación, en las Figura 30-34 se muestran algunas de las imágenes obtenidas, comparando las morfologías entre distintos tipos de acero con el mismo tratamiento térmico.

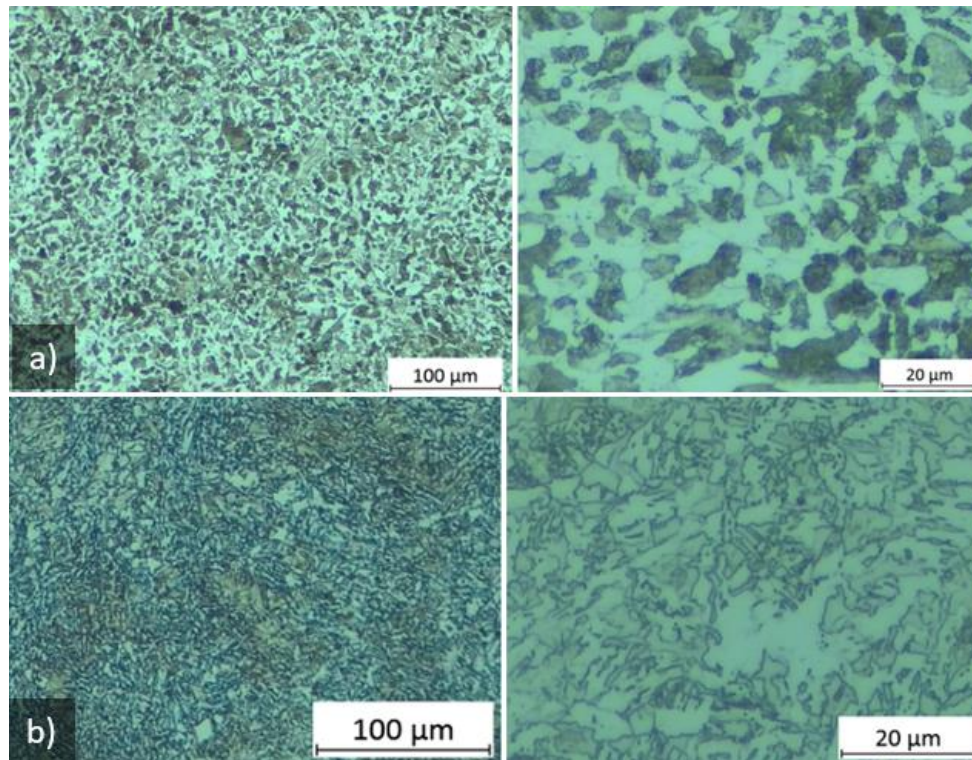


Figura 30. Comparación entre Muestra N°6 (a) y Muestra N°16 (b), probetas doble lomo con tratamiento térmico de normalizado.

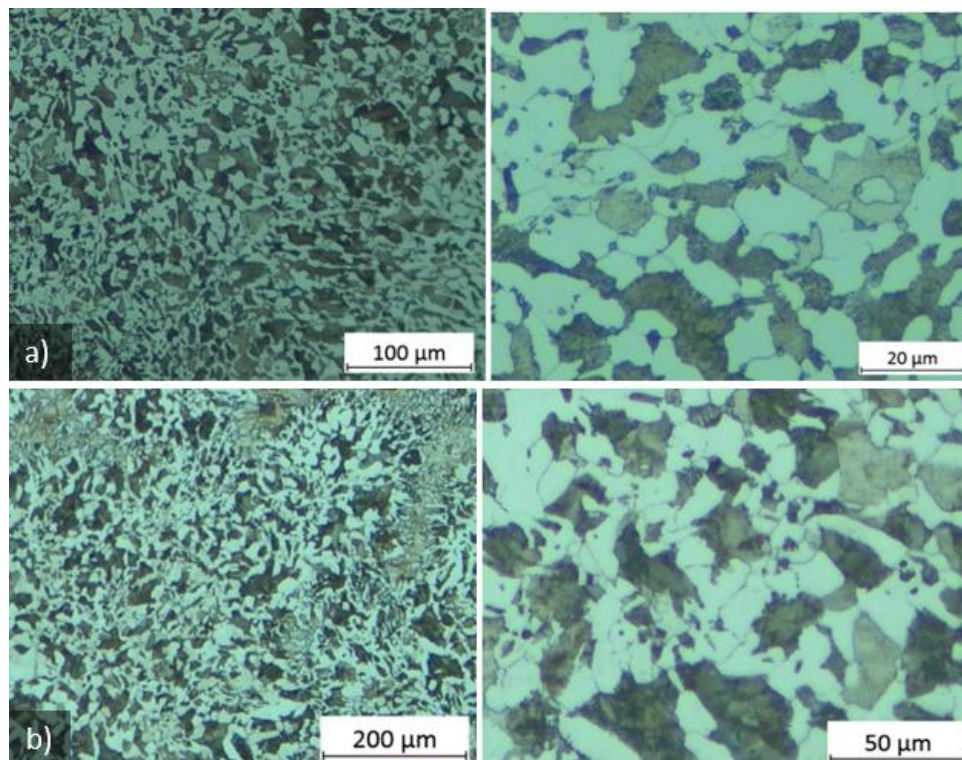


Figura 31. Comparación entre Muestra N°9 (a) y Muestra N°19 (b), probetas Keel Block de radio 42 con tratamiento térmico de normalizado.

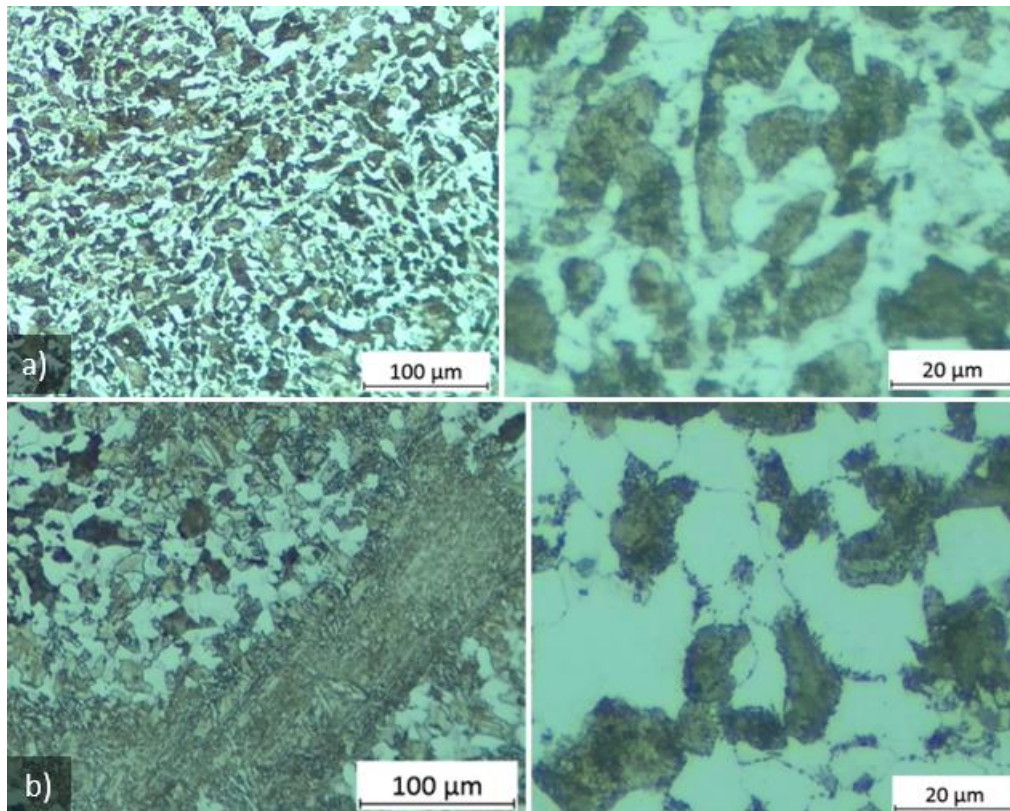


Figura 32. Comparación entre Muestra N°12 (a) y Muestra N°22 (b), probetas Keel Block de radio 60 con tratamiento térmico de normalizado.

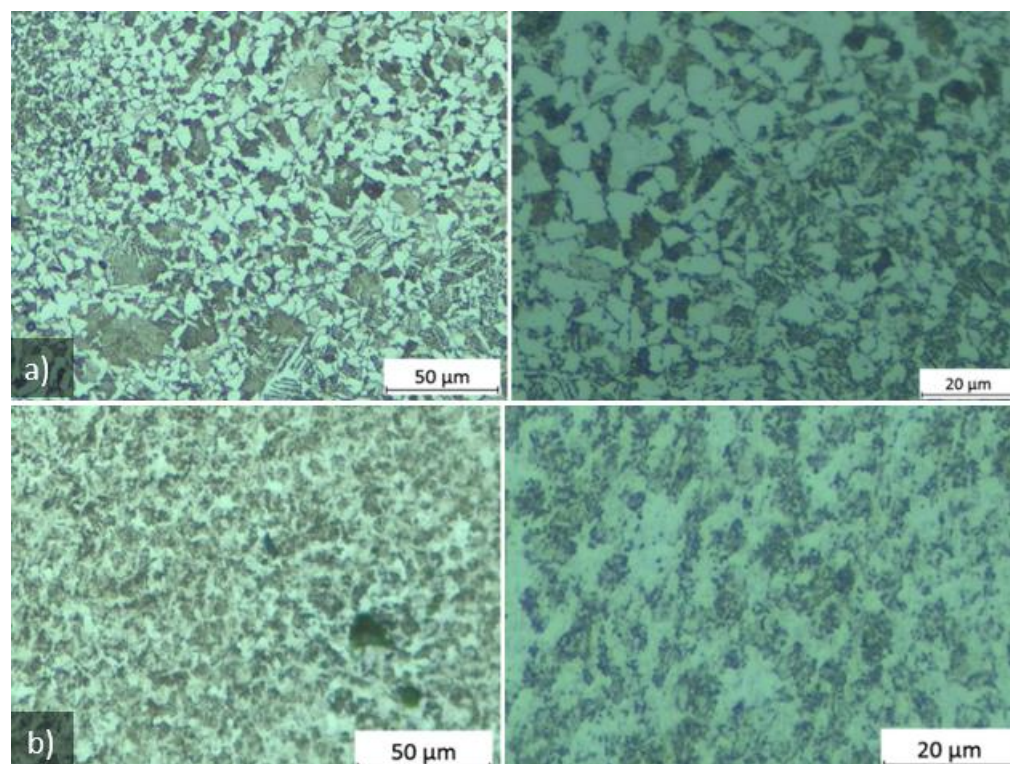


Figura 33. Comparación entre Muestra N°10 (a) y Muestra N°13 (b), probetas Keel Block de radio 42 con tratamiento térmico de normalizado, templado y revenido.

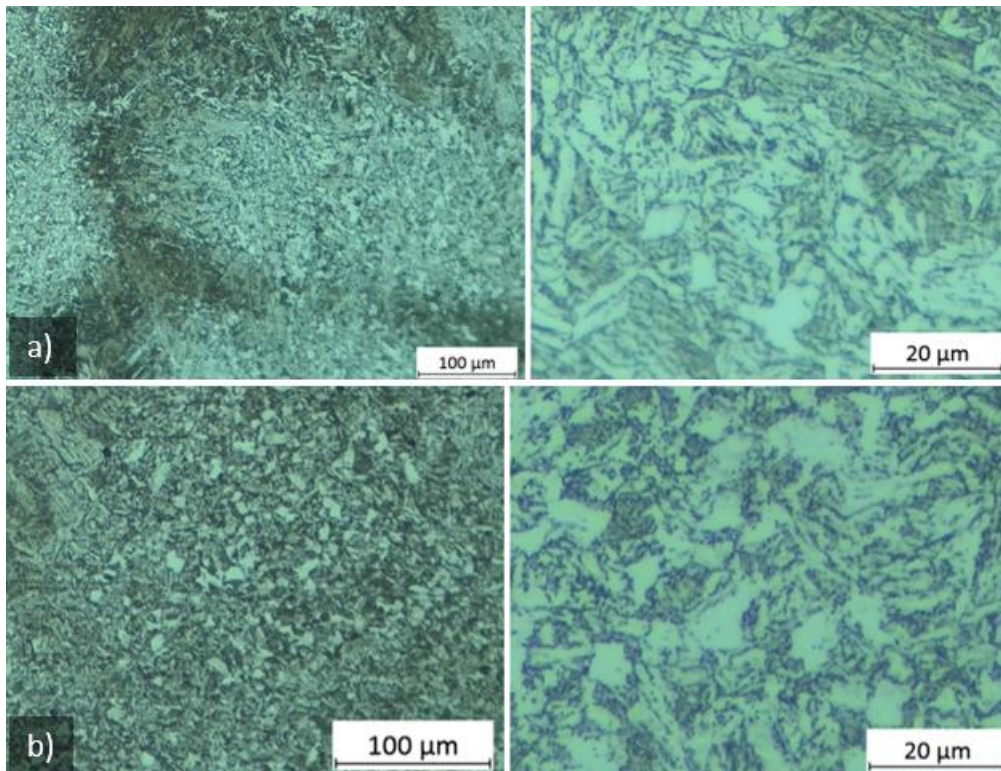


Figura 34. Comparación entre Muestra N°20 (a) y Muestra N°23 (b), probetas Keel Block de radio 60 con tratamiento térmico de normalizado, templado y revenido.

D. Dureza y Gradiente de Dureza

Se midieron durezas en distintas probetas, cada una representativa de un tratamiento térmico y espesor de pieza particular. En la Figura 35 se muestra un gráfico comparativo de los resultados para la colada 2, correspondiente al acero denominado “Grado A”. En la Figura 36 se muestra el mismo gráfico para la colada 3, correspondiente al acero denominado “Grado C”.

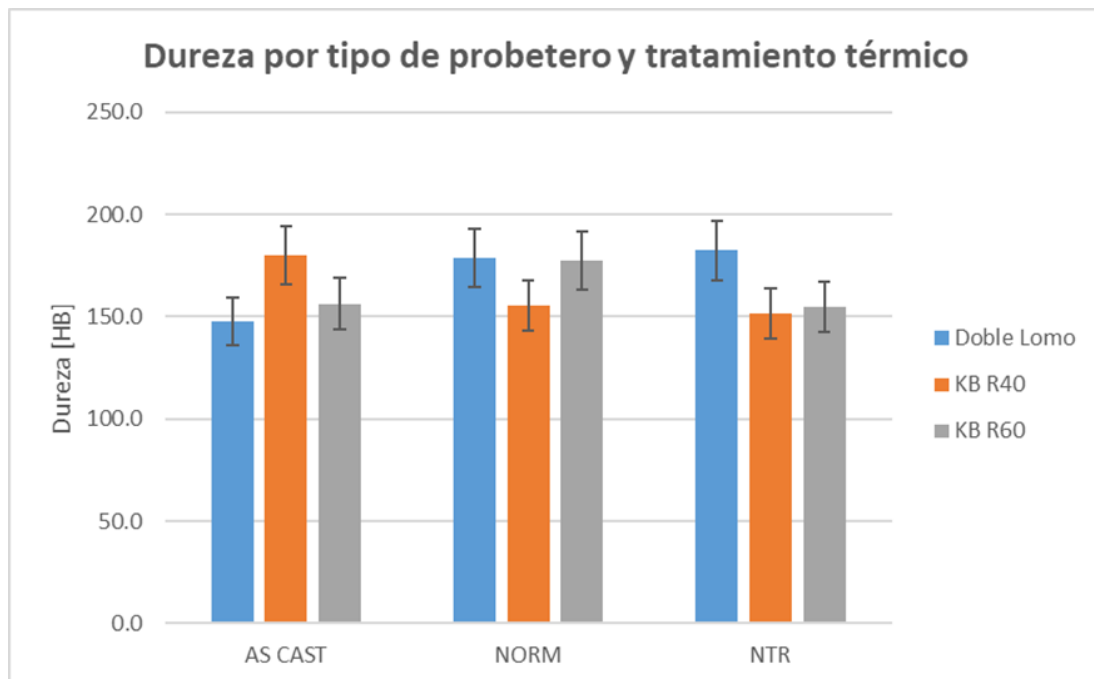


Figura 35. Resumen comparativo de resultados de dureza por tipo de probetero y tratamiento térmico, para probetas de colada 2 (Gr.A)

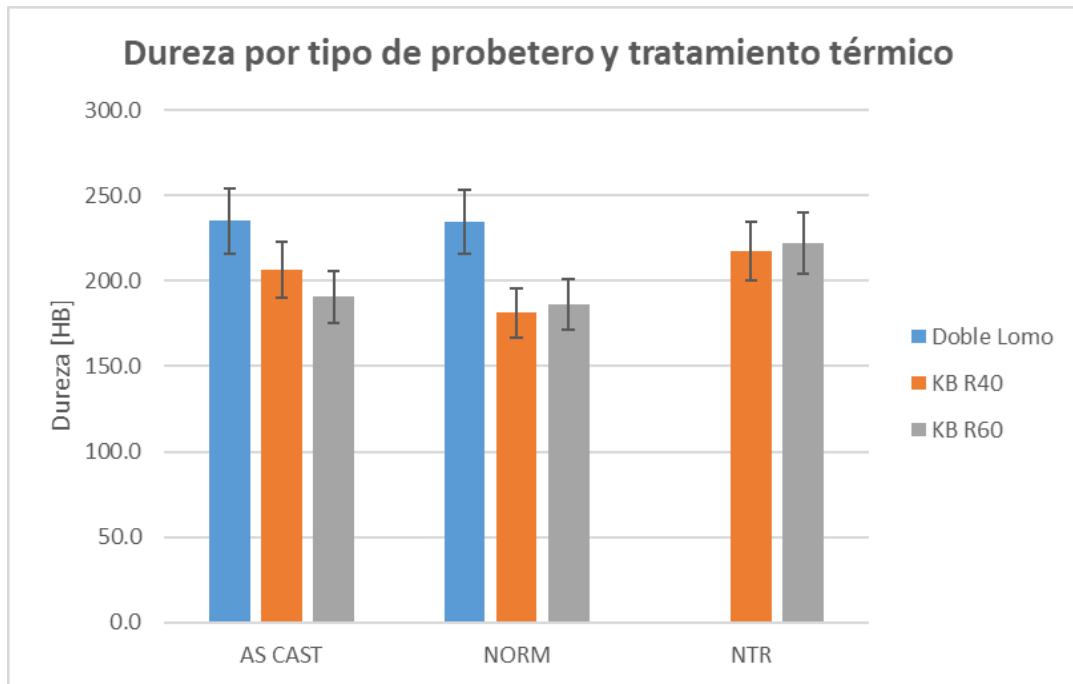


Figura 36. Resumen comparativo de resultados de dureza por tipo de probetero y tratamiento térmico, para probetas de colada 3 (Gr.C)

Por otro lado, también se estudió la variación de la dureza con respecto a la profundidad de la pieza. En las Figura 37 y Figura 38 se muestran los resultados resumidos para la colada de acero “Grado A” y “Grado C” respectivamente.

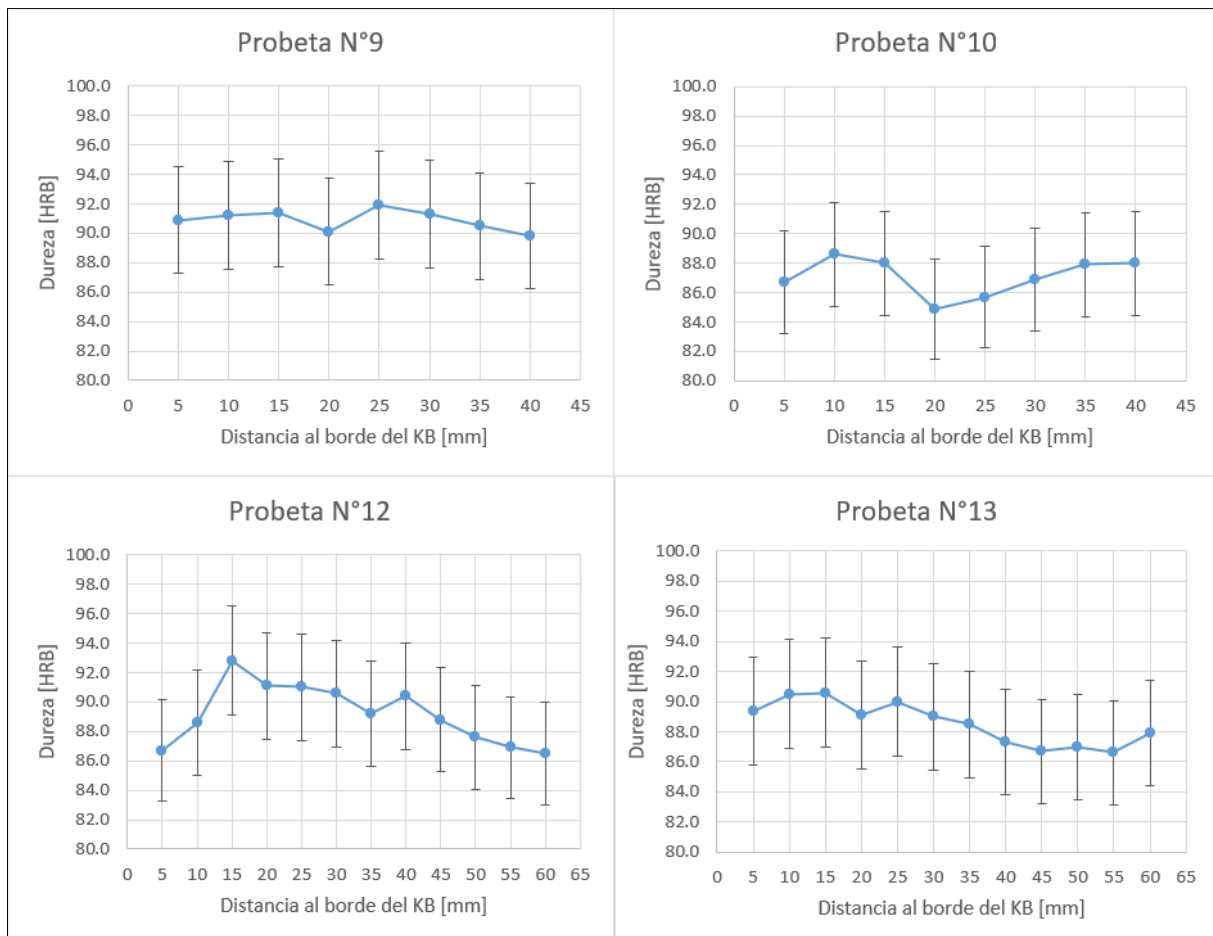


Figura 37. Resumen comparativo de resultados de gradiente de dureza para probetero Keel Block colada 2 (Gr.A)

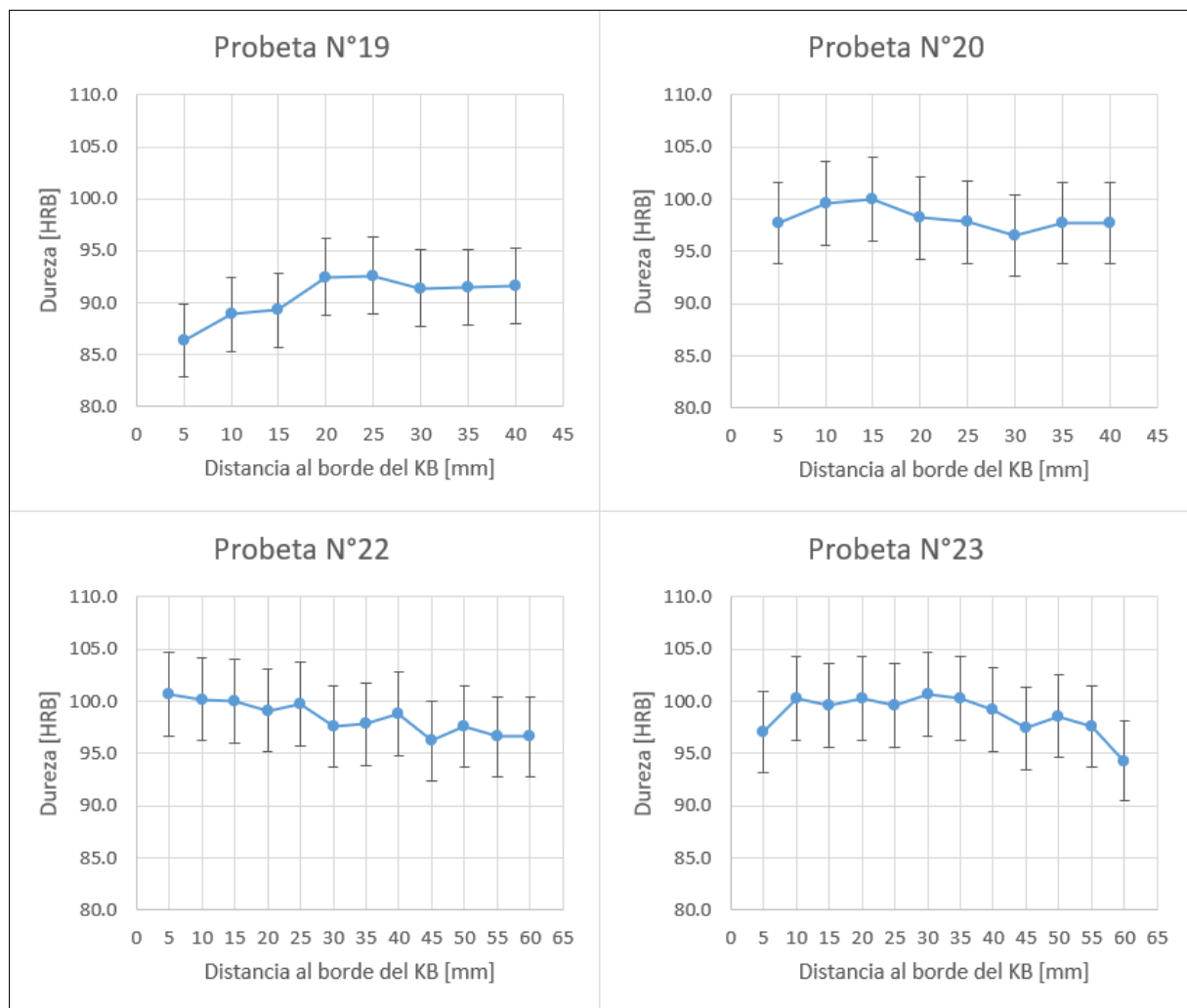


Figura 38. Resumen comparativo de resultados de gradiente de dureza para probetero Keel Block colada 3 (Gr.C)

E. Tracción

Se tornearon probetas de geometría cilíndrica con zona calibrada de 50 mm de largo y 12,5 mm de diámetro. Tanto la fabricación de las probetas como la realización de los ensayos de tracción se ejecutaron siguiendo especificaciones internas de la empresa, las cuales son usadas como estándar de fabricación de este tipo de aceros bajo norma^{[4][10]}. En las Figura 39 y Figura 40 se muestran los resultados obtenidos para cada probeta, correspondientes a las coladas de acero “Grado A” y “Grado C” respectivamente.

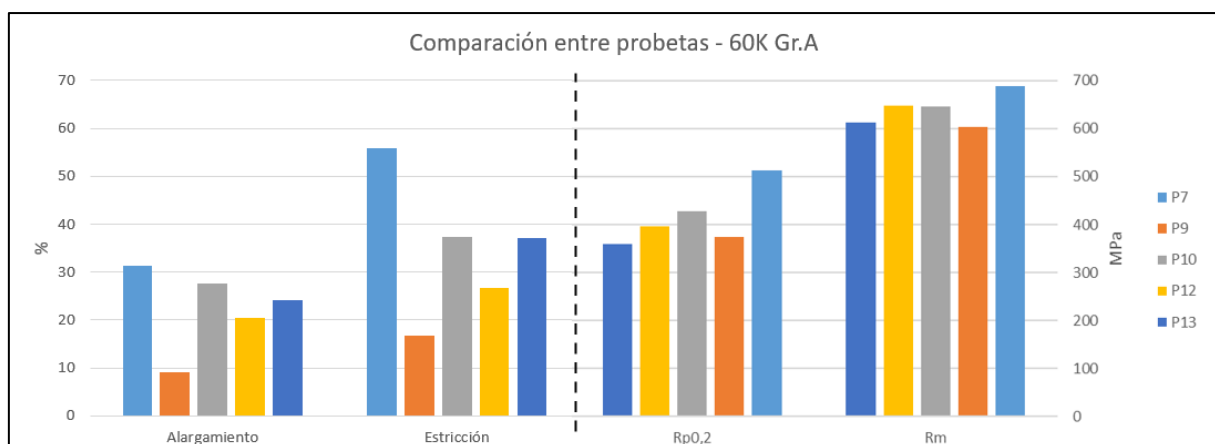


Figura 39. Comparación entre probetas de colada 2 (Gr.A). Se muestran: Alargamiento y estricción porcentual (eje vertical izquierdo), límite de fluencia y a la rotura (eje vertical derecho).

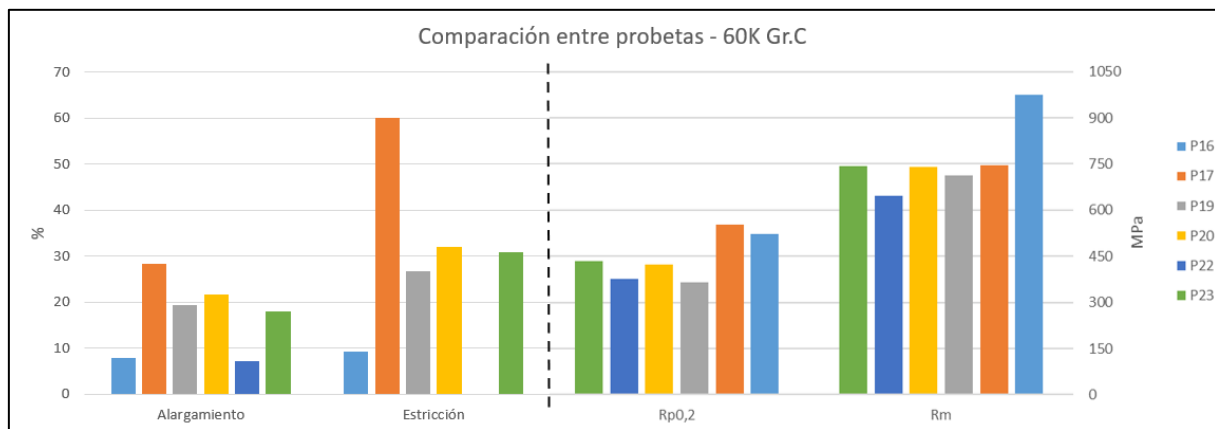


Figura 40. Comparación entre probetas de colada 3 (Gr.C). Se muestran: Alargamiento y estricción porcentual (eje vertical izquierdo), límite de fluencia y a la rotura (eje vertical derecho).

F. Observación de superficie de fractura

Una vez traccionadas las probetas, se observaron las superficies de fractura de cada una para identificar los mecanismos de rotura. Para esto, se utilizó una lupa estereoscópica. A continuación se muestran algunas de las imágenes obtenidas. En las Figura 41 y Figura 42 se comparan superficies de fractura para probetas de distinta profundidad de muestreo (Doble lomo, Keel Block radio 42 y radio 60) pero de la misma aleación, grados A y C respectivamente. Otro punto de comparación destacable es la diferencia de mecanismos de rotura entre probetas de distinta aleación pero igual tipo. Esto se muestra en las Figura 43 y 44, correspondiendo a probetas de tipo Keel Block radio 42 y radio 60 respectivamente.

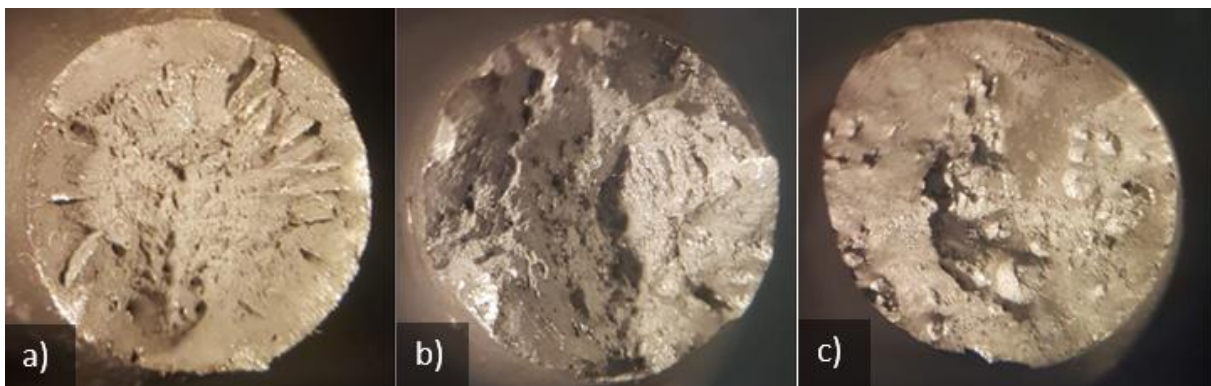


Figura 41. Comparación de probetas de la misma aleación (grado A) pero distinto espesor representativo de pieza, siendo (a) Doble lomo, (b) Keel Block radio 42 y (c) Keel Block radio 60.

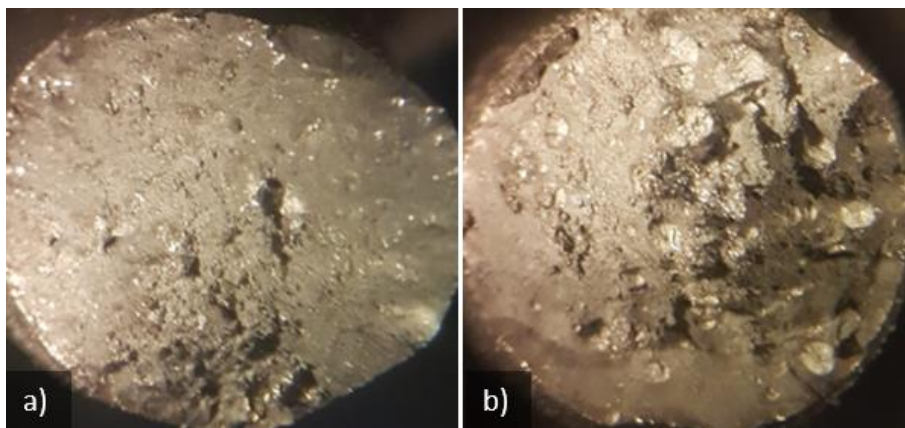


Figura 42. Comparación de probetas de la misma aleación (Grado C) pero distinto espesor representativo de pieza, siendo (a) Keel Block radio 42 y (b) Keel Block radio 60.

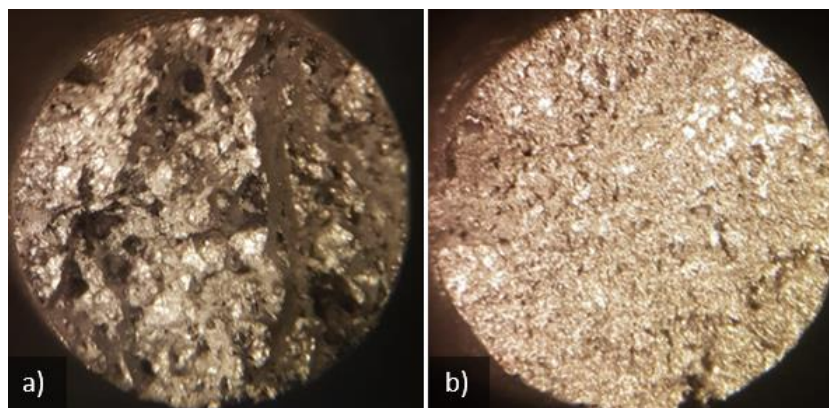


Figura 43. Comparación entre probetas de igual tipo (Keel Block radio 42) pero distinta aleación, siendo (a) Grado A y (b) Grado C.

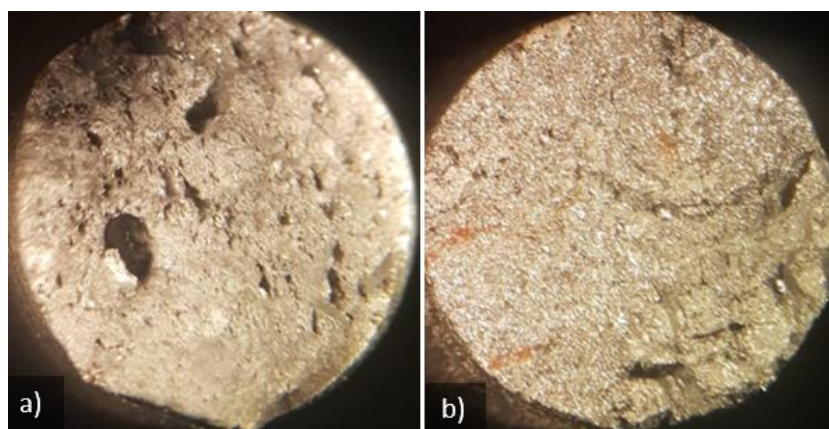


Figura 44. Comparación entre probetas de igual tipo (Keel Block radio 60) pero distinta aleación, siendo (a) Grado A y (b) Grado C.

G. Impacto – Charpy

Se envió material de cada muestra al laboratorio de ensayos CEDTEC. Allí se fabricaron probetas de Charpy de sección cuadrada de 10 mm, con entalla en “V” a 45° y sección de rotura de 0,8 cm². Se ensayó bajo norma ASTM E-23^[14] a -29°C. Por cada muestra se ensayaron tres probetas. En la Figura 45 se muestra una comparación de los resultados obtenidos para cada probeta.

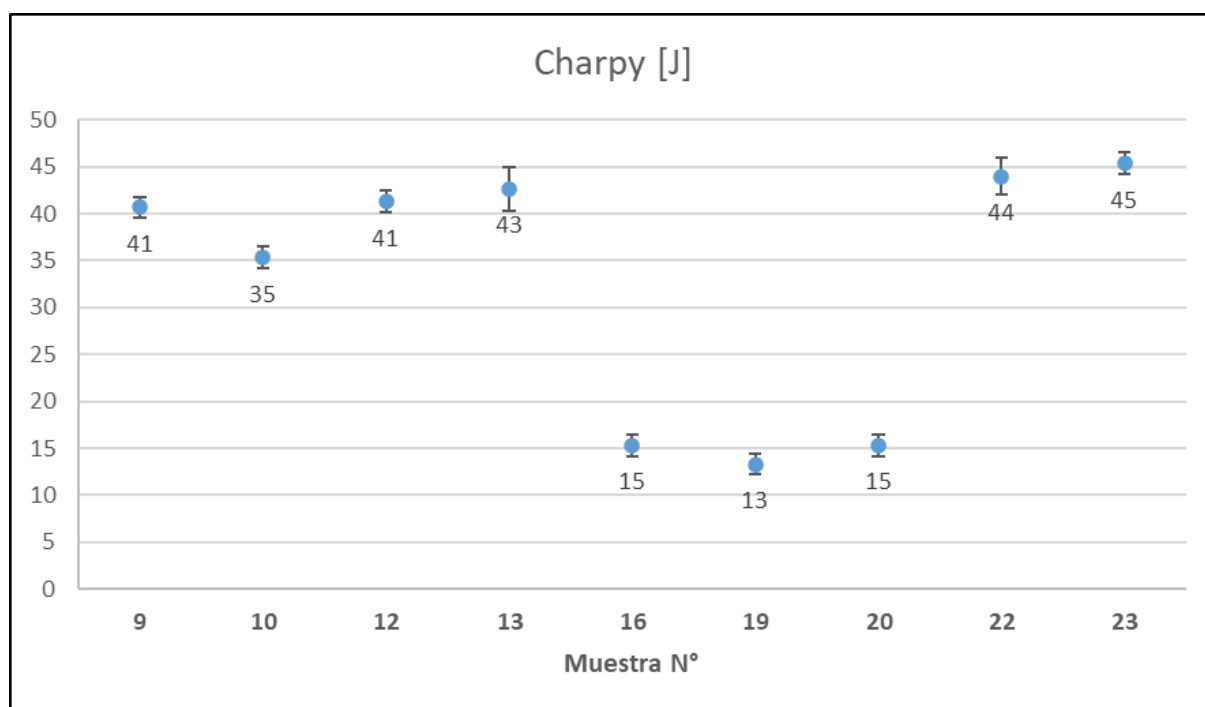


Figura 45. Gráfico comparativo de valores de impacto de Charpy obtenidos para cada probeta.

H. Templabilidad - Jominy

Se tornearon probetas de Jominy a partir de las muestras N°12 y N°22, tomadas de probeteros Keel Block R60 y normalizadas. Para ello, se utilizó un torno manual provisto por el taller del ITBA. Las probetas se fabricaron siguiendo la norma ASTM 255-99^[13]. El ensayo se realizó en una máquina de ensayos de Jominy fabricada por alumnos del ITBA y puesta a punto según lo requerido por norma. Previamente, se verificó el buen funcionamiento de la máquina con patrones de dureza y probetas de materiales con curvas de Jominy conocidas. Se siguió la metodología correspondiente para obtener valores de dureza Rockwell C en dos planos paralelos rectificados sobre las probetas ensayadas. En la Figura 46 se muestran las curvas de Jominy obtenidas.

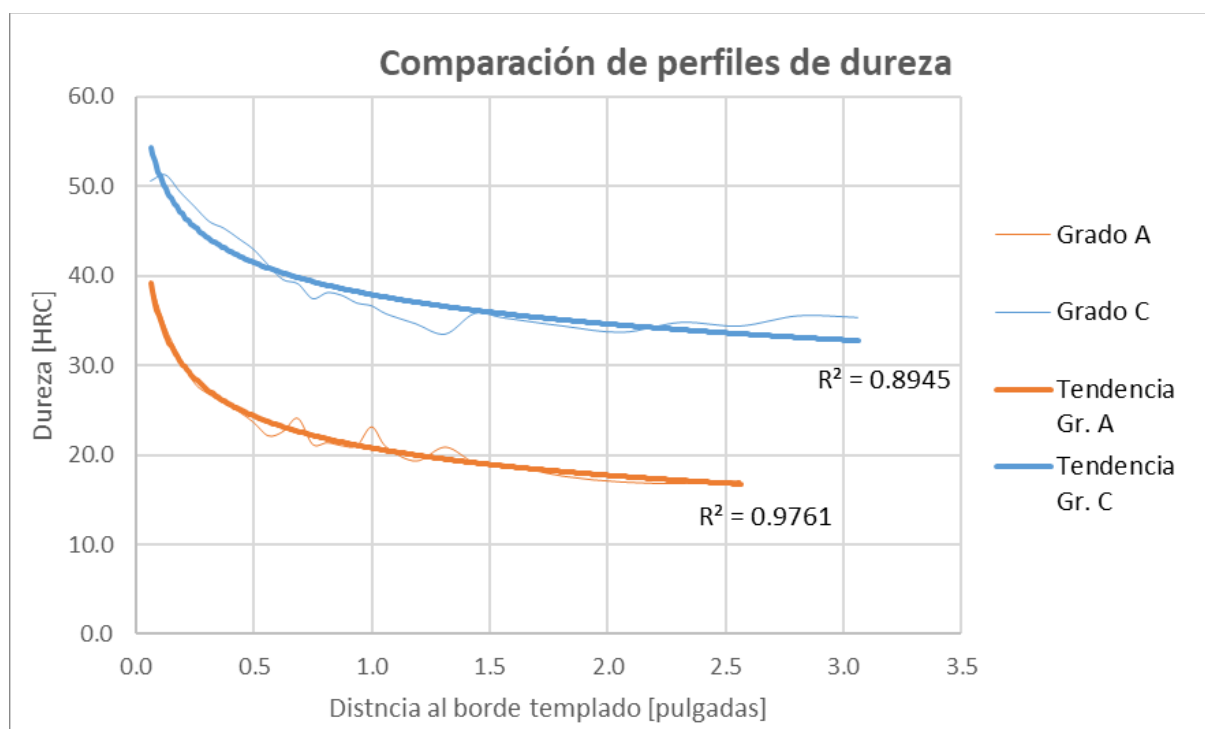


Figura 46. Gráfico comparativo de las curvas de Jominy obtenidas para las probetas N°12 (Gr. A) y N°23 (Gr. C)

6. Conclusión

Siguiendo la estructura y el plan del trabajo realizado, las conclusiones se pueden también separar en dos aspectos bien marcados:

El primero, correspondiente a la primer etapa y reafirmado en la segunda, habla de las propiedades del material estudiado en general y su variación con el espesor representativo de las piezas de fabricación. Aquí podemos describir los comportamientos del acero tipo API 60 K Grado A bajo distintos tratamientos térmicos y su evolución en probetas donde la velocidad de enfriamiento cambia a lo largo de la sección del material. Esto resulta particularmente útil para comprender la versatilidad del producto durante cada etapa de fabricación y predecir el comportamiento del mismo bajo condiciones de servicio posterior a su venta. Si bien la norma^[4] especifica los límites admitidos de algunas de estas propiedades, se logró no solo corroborar esto sino también expandir el conocimiento para otras que no son delimitadas por los estándares de fabricación.

En segundo lugar, al estudiarse las propiedades de una segunda aleación se exploró la posibilidad de modificar la composición del acero para mejorar algunas de estas en el producto final. Partiendo del material base denominado como "Grado A" y modificando la cantidad de algunos aleantes se logró incidir en los resultados de los ensayos y, por lo tanto, en el rendimiento operativo del material. Se lograron identificar

tendencias en los resultados según el tipo de aleación, siendo algunas favorables y otras no admisibles para su fabricación. Si bien se probó la factibilidad de su fabricación, esta no resultó favorable para la empresa en cuanto a la modificación de las proporciones de aleantes a utilizar y su aplicación bajo norma API para los productos requeridos. A pesar de que la variante no fue tomada como válida, el haber sumado conocimiento técnico acerca de otro tipo de material fue valorado positivamente por los representantes de Microwen.

En el estudio del acero aleado Grado A, se encontró que los valores de las propiedades medidas se correspondían con cada etapa de fabricación y por ende con el historial térmico de las piezas. Esto se corroboró observando los microconstituyentes obtenidos en las muestras después de cada tratamiento y comparando con los niveles de dureza, aspectos de las superficies de fractura, valores de resistencia mecánica y a fluencia, los alargamientos porcentuales y estricciones de las probetas ensayadas a tracción. Esto demuestra que durante el proceso de fabricación del acero, el mismo se transforma de manera predecible y esperada para resultar en un material alineado a los estándares de los productos deseados para la industria del petróleo. Asimismo se observaron algunos defectos inevitables, aunque mitigables, durante el proceso como lo son las inclusiones no metálicas y la descarbonización superficial como resultado de desviaciones prácticas de proceso y corrosión a altas temperaturas respectivamente.

En cuanto a la influencia de los espesores de las piezas, o las probetas que los representan, se notaron varias tendencias. Tal como lo indica la teoría, una mayor profundidad de material implica un gradiente más suave de temperaturas y tiempos más prolongados de enfriamiento, haciendo menos efectivos los tratamientos térmicos. Esto resulta en piezas de mayor espesor con tamaños de grano mayores, transformaciones de fases en estado sólido menos efectivas, microestructuras más heterogéneas, niveles de resistencia mecánica menores y piezas más frágiles. Por lo contrario, los niveles de dureza y los gradientes de la misma no se vieron afectados significativamente en las variaciones geométricas estudiadas. Tampoco se notaron variaciones relevantes en la resiliencia de las probetas de distinto espesor.

Al modificar la proporción de algunos aleantes en el metal se afectaron de manera positiva la templabilidad y los niveles de dureza de las piezas a mismo porcentaje de Carbono. También se obtuvieron niveles de resistencia mecánica mejores, evidenciando una sinergia de los aleantes en el acero. Si bien esto es deseable en los productos finales de fabricación, la fragilidad de la nueva aleación resultó mayor que la original. Esto puede deberse a una segregación marcada de los aleantes a los bordes de grano y su permanencia en estas zonas a pesar de los tratamientos térmicos posteriores, generando caminos preferenciales de fisura. Tampoco se observaron mejoras en cuanto a la resiliencia de la nueva aleación.

En general se logró corroborar la validez del material bajo norma y la eficacia del acero fabricado normalmente (grado A) en contraste con la aleación de prueba (grado C), permitiendo a la empresa continuar con la manufactura de sus productos teniendo la certeza del buen rendimiento de su variante actual.

7. Bibliografía

- [1] Profesor Dr.-Ing. Karl Roesch, Dipl.-Ing. Kurt Zimmermann, *Acero Moldeado*, Edición española, Editecna – Revista Fundición, 1969.
- [2] <http://www.wenlen.com/index.php> , 20/12/2021.
- [3] José Apraiz Barreiro, *Tratamientos térmicos de los aceros*, 8ª edición, Editorial Dossat S.A., reimpresión 1984.
- [4] API specification 6A (2011), *Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment*
- [5] ASTM A 255 (1999), *Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel*
- [6] ASTM E 415 (2021), *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*.
- [7] ASM, *Metallography and Microstructures*, Volume 9, ASM Handbook, fifth printing 1992.
- [8] ASTM E 18 (2022), *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*.
- [9] ASTM E 384 (2022), *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*.
- [10] ASTM E8/E8M (2022), *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
- [11] Miguel Ipohorski, R. J. Acuña, *Fractografía Aplicaciones al Análisis de Fallas*, Informe técnico, CNEA, 1988.
- [12] ASM, *Fractography*, Volume 12, ASM Handbook, 1987.
- [13] ASTM A255 (1999), *Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel*.
- [14] ASTM E23 (2023), *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.

8. Anexo

En esta sección se adjuntan los informes emitidos del trabajo desarrollado. Los mismos corresponden a la primer y segunda etapa del trabajo:

- IE-PF-2022-00 INFORME DE CARACTERIZACIÓN
- IE-PF-2022-01 INFORME DE CARACTERIZACIÓN

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 1 de 33

DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	
Nombre/Razón social de solicitante	Microwen
Documento asociado	
Fecha de fabricación de muestras	30-12-2021
Fecha de redacción del informe	18-03-2022
Ensayos realizados	Composición química, Metalografía, Macrografía, Dureza, Microdureza, Tracción, Observación de superficie de fractura, Composición de inclusiones con SEM-EDS
Descripción de la muestra	Acero fundido de baja aleación API 60K
Identificación de la/s muestra/s	P1 – P2 – P3 – P4

Índice de contenidos

1 – MUESTRAS	2
2 – COMPOSICIÓN QUÍMICA	2
3 – MACROGRAFÍA	3
4 – METALOGRAFÍA	4
5 – DUREZA Y MICRODUREZA.....	17
6 – TRACCIÓN	19
7 – OBSERVACIÓN DE SUPERFICIE DE FRACTURA	22
8 – COMPOSICIÓN DE INCLUSIONES CON SEM-EDS	24
9 – CONCLUSIONES	32

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 2 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

1 – MUESTRAS

Las muestras fueron extraídas de diferentes etapas del proceso de colada y tratamiento térmico de una fundición de acero de baja aleación “60K” según norma API 6A. Corresponden a un acero hipoeutectoide de baja aleación. Las probetas fueron extraídas en las siguientes etapas del proceso de fabricación:

- P1: Bruto de colada
- P2: Normalizado
- P3: Normalizado y templado
- P4: Normalizado, templado y revenido

Los probeteros utilizados para la fabricación de las muestras son del tipo doble lomo. Se realizaron cortes sobre los mismos al momento de separación de cada muestra, obteniendo cuatro lomos como se muestra en la **Figura 1**, cada uno extraído en la etapa del proceso mencionadas anteriormente.



Figura 1. Muestras obtenidas de probeteros tipo “doble lomo” identificadas como P1, P2, P3 y P4

2 – COMPOSICIÓN QUÍMICA

Se analizó la composición química de una muestra extraída directamente del horno, antes de iniciar la colada. Se utilizó un espectrómetro SPECTROMAX, propiedad de Microwen. La composición se muestra a continuación en la **Tabla 1**.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,306	0,6	1,33	0,013	0,0047	0,234	0,154	0,024

Tabla 1. Composición química como % en masa, obtenida mediante espectrómetro

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 3 de 33

3 – MACROGRAFÍA

Se pulieron y observaron las muestras, encontrando únicamente un poro en el seno del material de la probeta P4 como se muestra en la **Figura 2**. Se observó la zona bajo lupa ZEISS Stemi 304, cámara Motic S12 con campo oscuro y se midió el tamaño del defecto de colada (ver **Figura 3**).



Figura 2. Defecto de colada en probeta P4

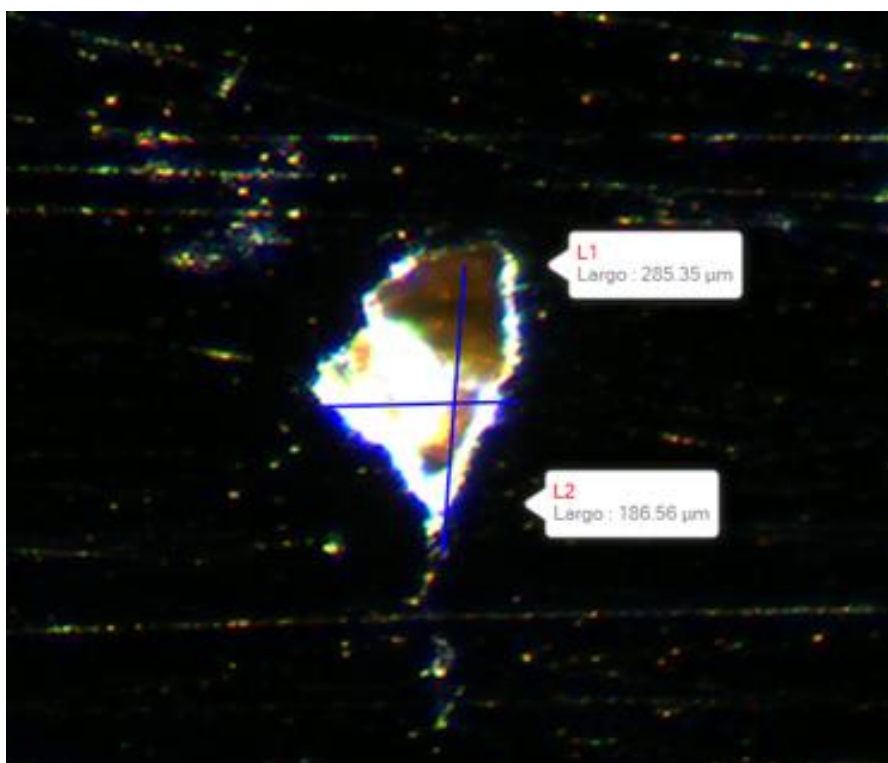


Figura 3. Medición de tamaño de poro bajo lupa y campo oscuro

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 4 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

4 – METALOGRAFÍA

Se prepararon y observaron las muestras en un microscopio óptico ZEISS Axiovert A1 con distintos aumentos: x50, x100, x200, x500 y x1000. A continuación se muestran las morfologías observadas para cada muestra.

P1:

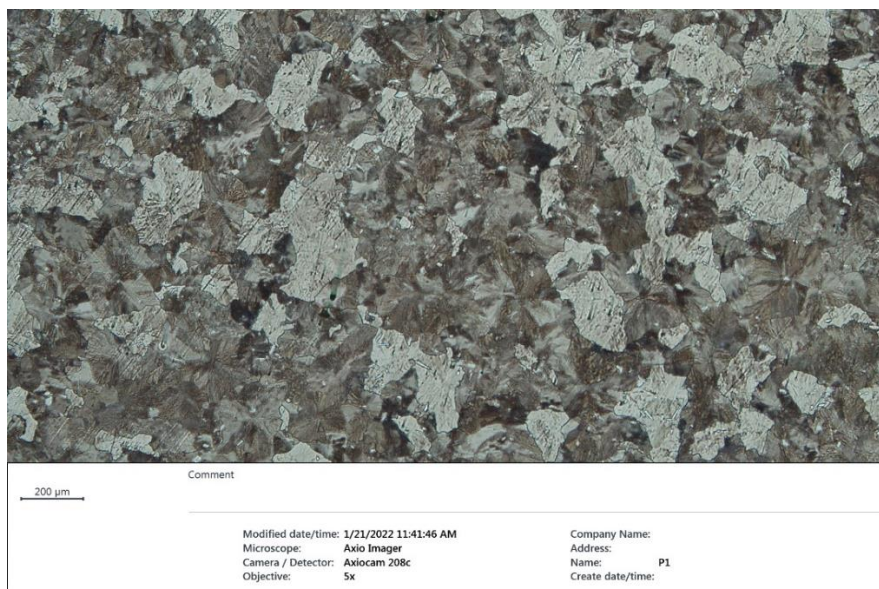


Figura 4. Aumento x50. Se observa una estructura de grano heterogénea tanto en composición como en tamaño

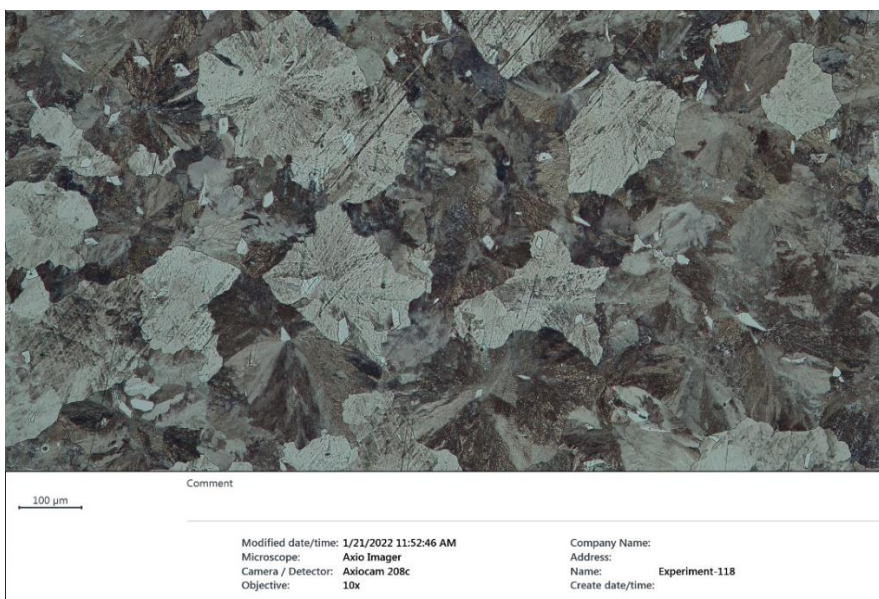


Figura 5. Aumento x100. Se distinguen estructuras ferríticas y perlíticas finas y gruesas, sin orientación preferencial

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 5 de 33



Figura 6. Aumento x50. En el borde exterior de la pieza se puede observar cierto grado de descarburación superficial hasta 500μm en profundidad. En dicha zona es predominante la ferrita por sobre la perlita, debido a la menor cantidad de carburos presentes



Figura 7. Aumento x500. Se observan cristales de ferrita, perlita y bainita superior, donde en granos de perlita gruesa se resuelven láminas de cementita

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 6 de 33

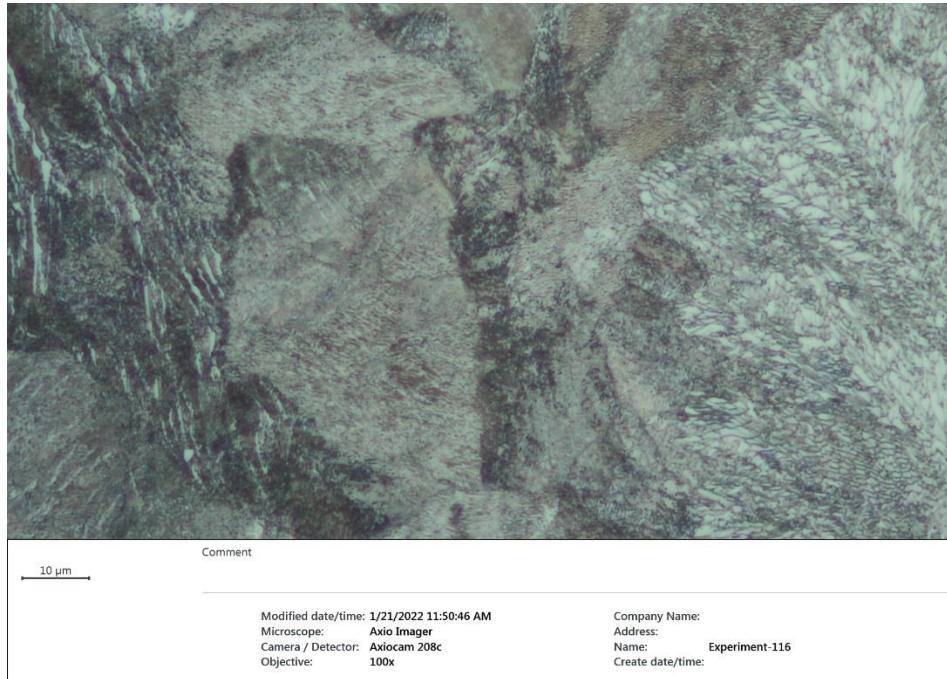


Figura 8. Aumento x1000. Se observan de izquierda a derecha: estructuras de tipo Widmanstätten típica de aceros en bruto de colada con precipitaciones de ferrita proeutectoide en forma de agujas; perlita gruesa donde se resuelven las láminas de cementita; perlita fina de color gris más homogéneo y sin resolver láminas; bainita superior de aspecto arborescente



Fig. 15 ASTM A148 steel, grade 90-60 (0.30% C, 1.65% Mn), 25 by 25 by 13 mm (1 by 1 by 0.5 in.), in the as-cast condition. The microstructure consists of ferrite (white) in a matrix of pearlite (dark). 4% nital. 100×

ASM HANDBOOK Vol. 9 Metallography and Microstructures - Carbon and Low-Alloy Steel Castings (Página 415)

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 7 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

P2:



Figura 9. Aumento x50. Se observa una estructura fina y homogénea, característica de un acero normalizado a baja temperatura (900°C) de bajo contenido de carbono (0,3%)

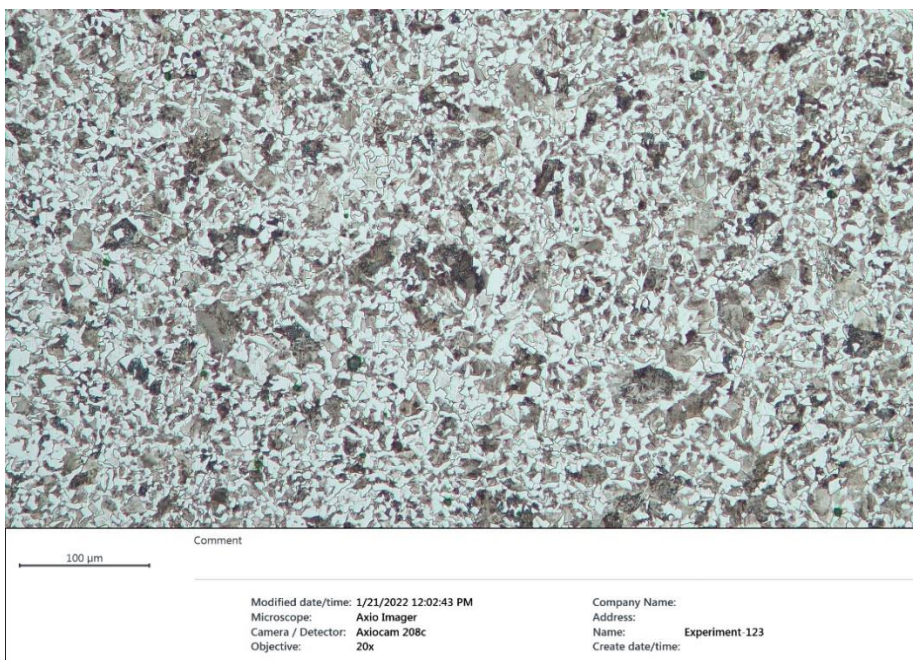


Figura 10. Aumento x200. Se resuelven granos oscuros de perlita fina sobre un fondo de granos claros de ferrita predominantes

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 8 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

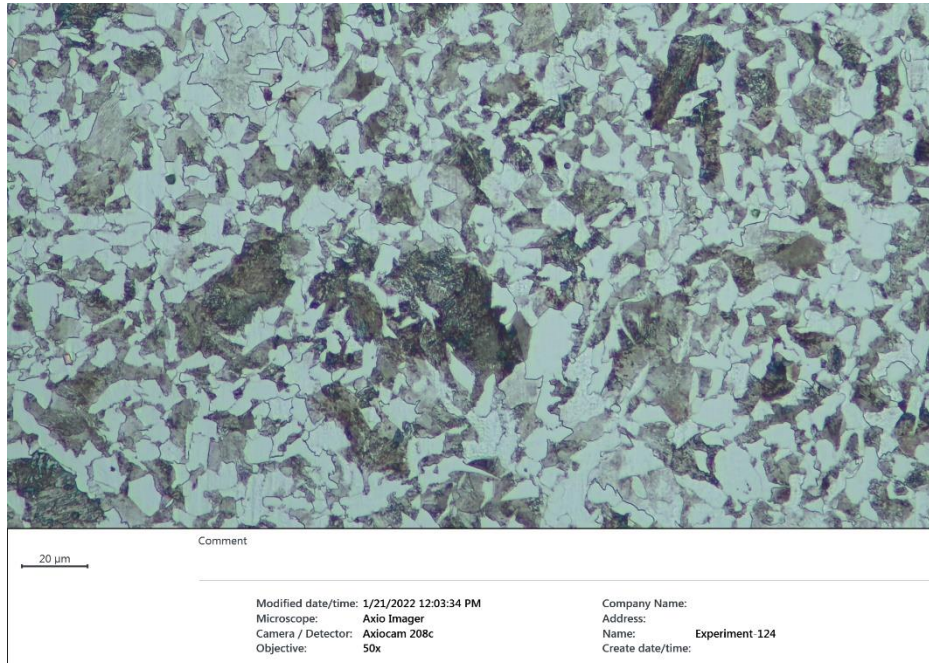


Figura 11. Aumento x500. Se observa la misma morfología que en la Figura 10, con granos de perlita gruesa donde se resuelven láminas de cementita.

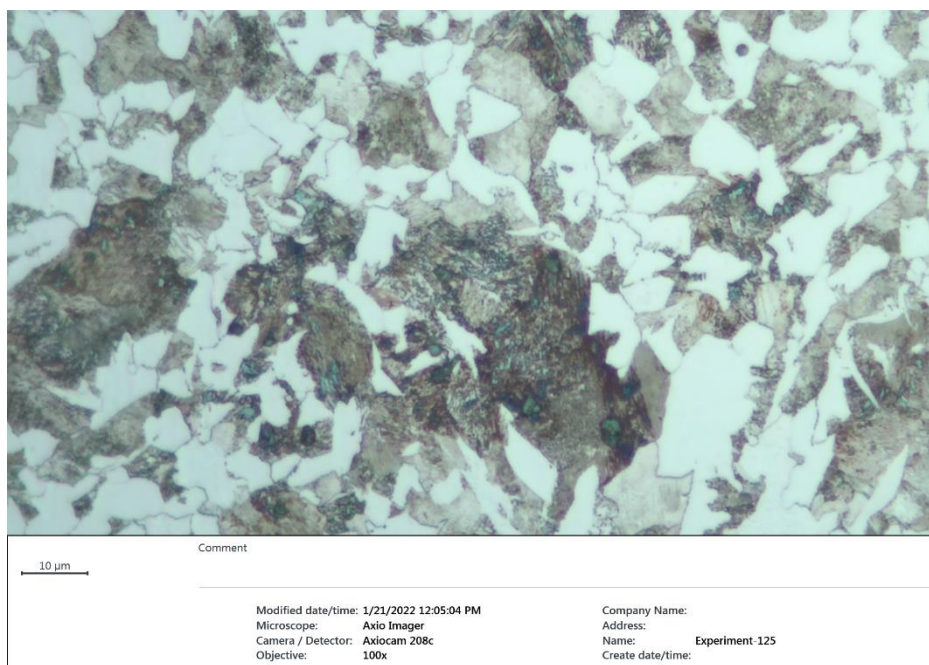


Figura 12. Aumento x1000. El tamaño de grano es del orden de las decenas de micrómetros, siendo de menor tamaño los granos de ferrita

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 9 de 33

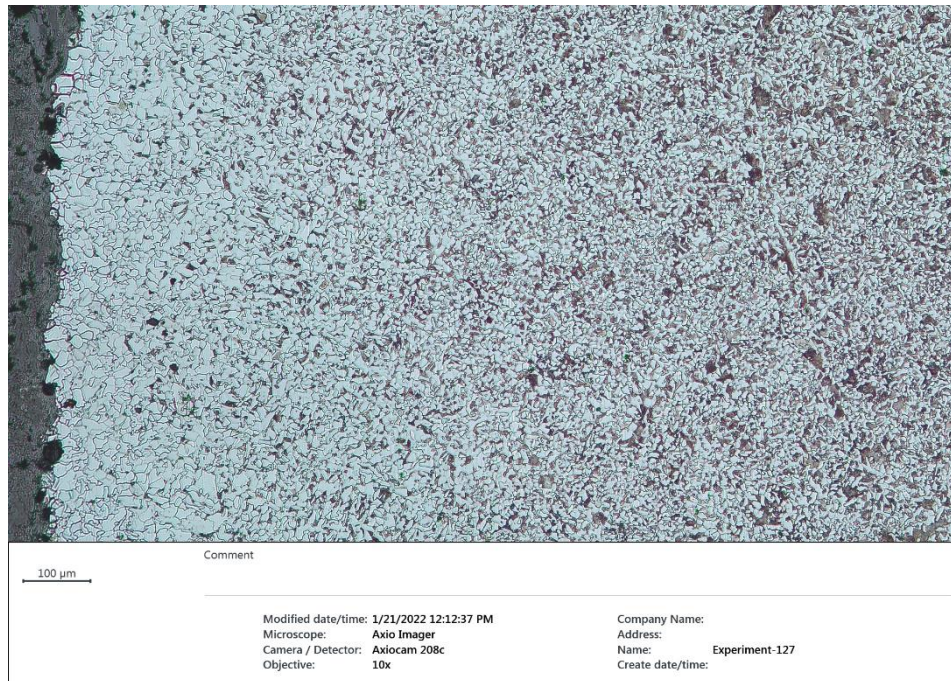
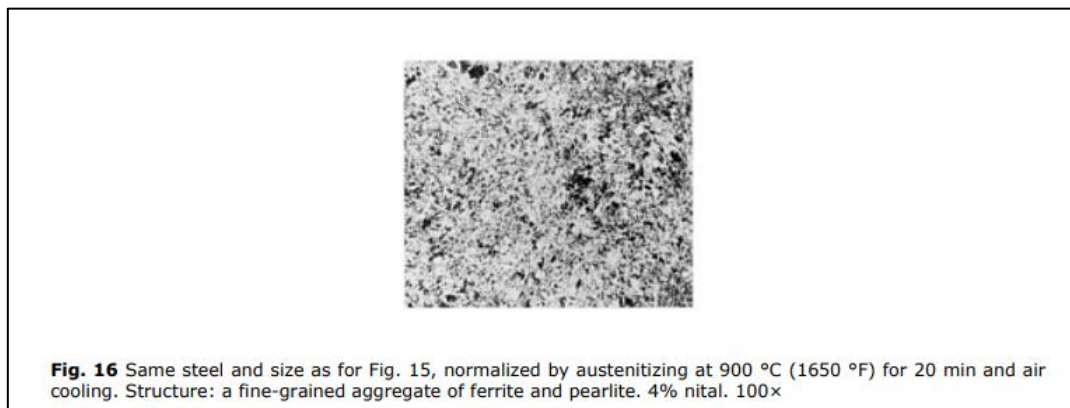


Figura 13. Aumento x50. Se mantiene el fenómeno de descaburación superficial descrito en la probeta P1. En este caso el alcance es menor, de aproximadamente 200 μm, evidenciando una mayor homogeneidad de la composición del acero en esa zona



ASM HANDBOOK Vol. 9 Metallography and Microstructures - Carbon and Low-Alloy Steel Castings
(Página 416)

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 10 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

P3:

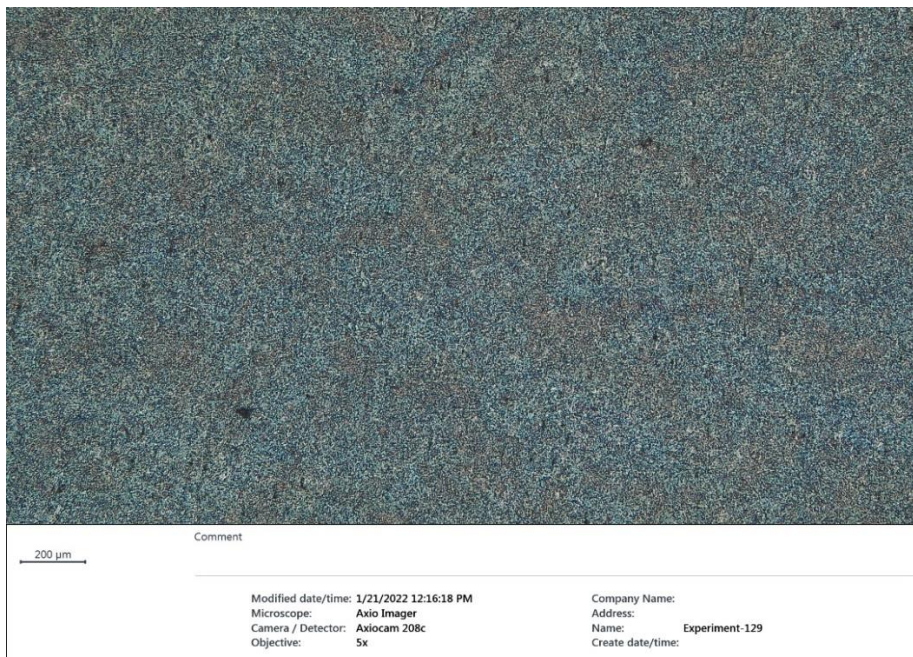


Figura 14. Aumento x50. Se observa una estructura fina y homogénea, con algunas inclusiones no metálicas



Figura 15. Aumento x50. Se observa que la descaburación superficial continua presente. También se distinguen tres coloraciones diferentes en zonas de aproximadamente 400 µm y 600 µm hacia el centro de la pieza (de derecha a izquierda en la imagen)

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 11 de 33



Figura 16. Aumento x200. La estructura es de agujas finas representativas de la martensita. Se observa una inclusión no metálica con su entorno de color más claro que el del resto de la microestructura



Figura 17. Aumento x500. Se distingue mejor la estructura martensítica, propia de una pieza templada.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 12 de 33

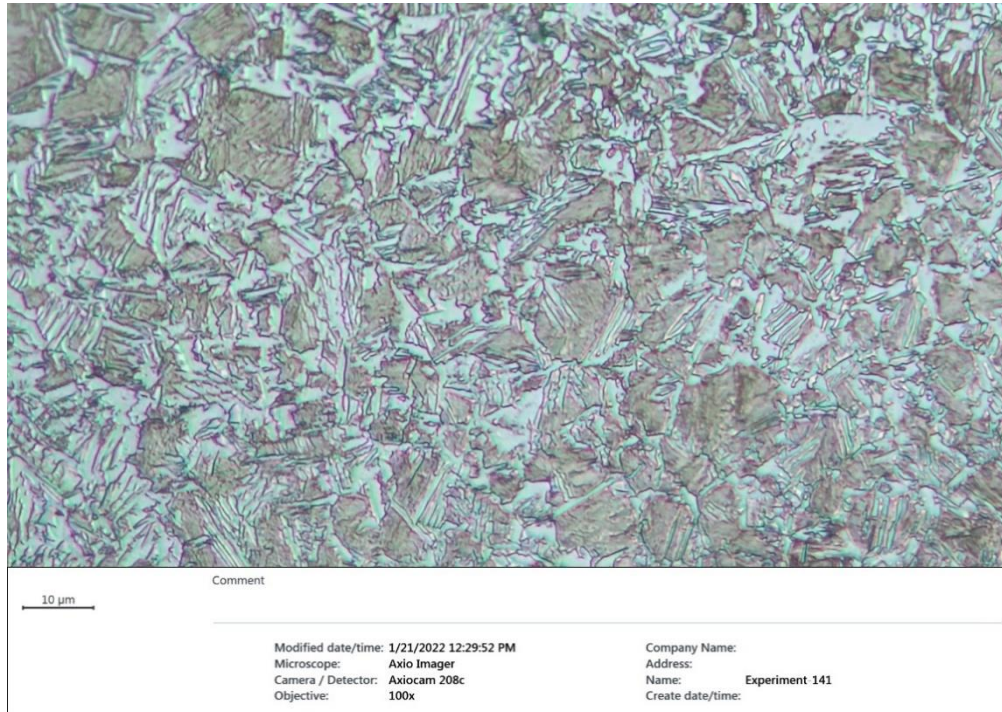
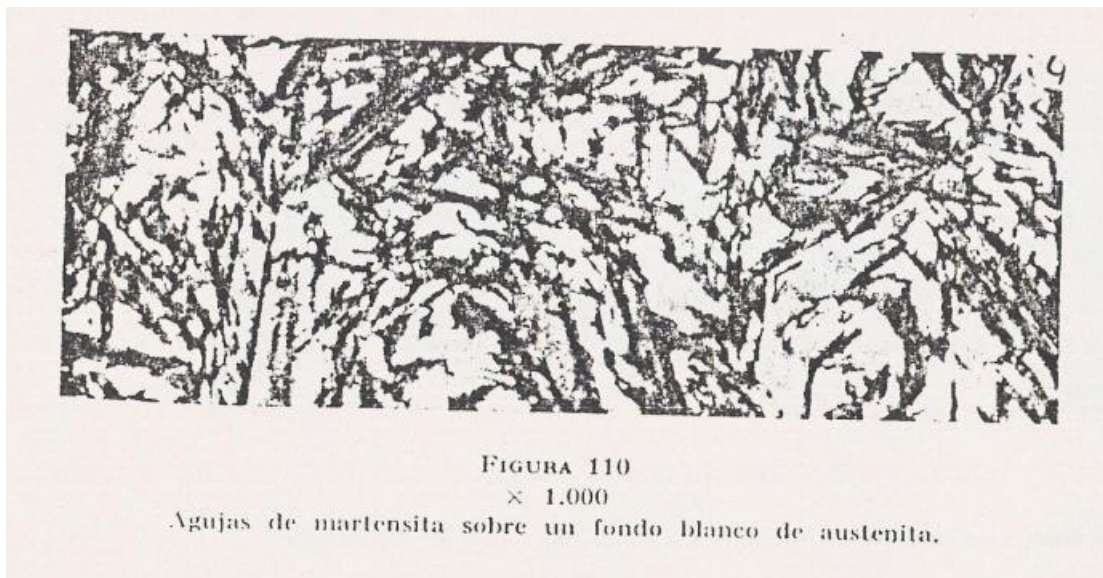


Figura 18. Aumento x1000. Se observa una estructura de agujas de martensita sobre un fondo blanco de austenita, sin ninguna orientación preferencial



A. Barreiro, Tratamientos Térmicos – Constituyentes microscópicos de los aceros (Página 118)

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 13 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

P4:



Figura 19. Aumento x50. Luego del revenido, la estructura es de un color más oscuro que en P3. La estructura de grano es fina y homogénea en toda la pieza



Figura 20. Aumento x50. Se puede ver una inclusión no metálica que afecta su entorno cercano y la misma descarbonización superficial de aproximadamente 400 μm presente en las demás muestras

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 14 de 33



Figura 21. Aumento x100. Se colocó cinta adhesiva en una porción de la muestra con el fin de protegerla del ataque químico y poder realizar un análisis de contenido inclusionario. En la porción atacada se observa la misma estructura que en la figura 19



Figura 22. Aumento x500. Se resuelve una estructura perlítica con carburos de geometrías difusas sobre ferrita de color blanco como se ve en la imagen. Dentro de la familia perlítica, se puede hacer referencia a la sorbita por su apariencia caótica. En la actualidad, es más común referirse a una estructura de martensita revenida

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 15 de 33

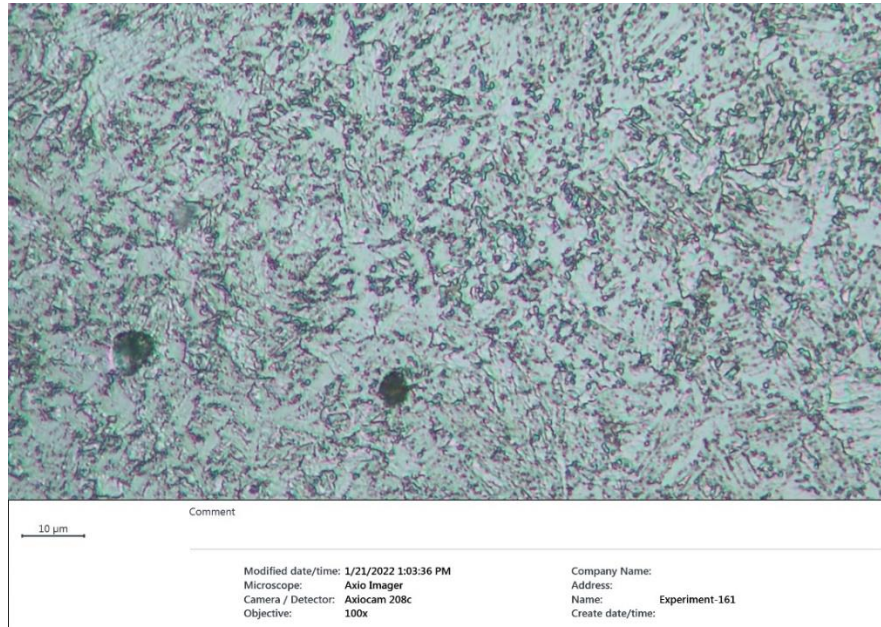
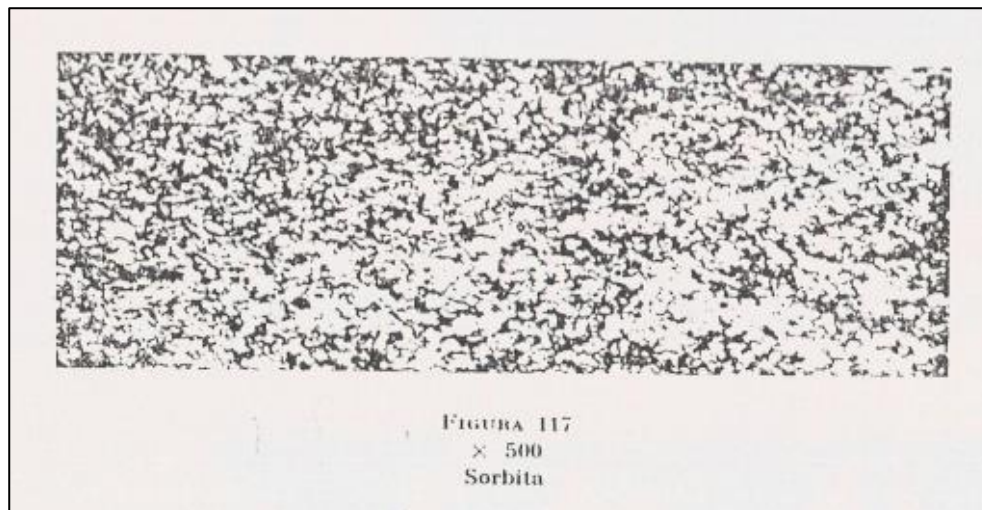


Figura 23. Aumento x1000. Se observa una estructura perlítica fina de fondo con contenido de carburos globulares y de geometría variada. Se ven también dos inclusiones no metálicas



A. Barreiro, Tratamientos Térmicos – Constituyentes microscópicos de los aceros (Página 123)

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 16 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

A continuación en la **Tabla 2** se muestran los resultados obtenidos para el recuento de contenido inclusionario sobre las muestras presentadas en la **Figura 24**.

Probeta N°	Sulfuros (A)		Aluminatos (B)		Silicatos (C)		Óxidos Globulares (D)	
	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa
P1	1	0,5	0	0	0,5	1	1,5	1,5
P2	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	2	2
P3	0	0	0,5	0,5	0,5	1	2	2
P4	0	0,5	0,5	0,5	0	0,5	3	2,5

Tabla 2. Tenor inclusionario para cada probeta

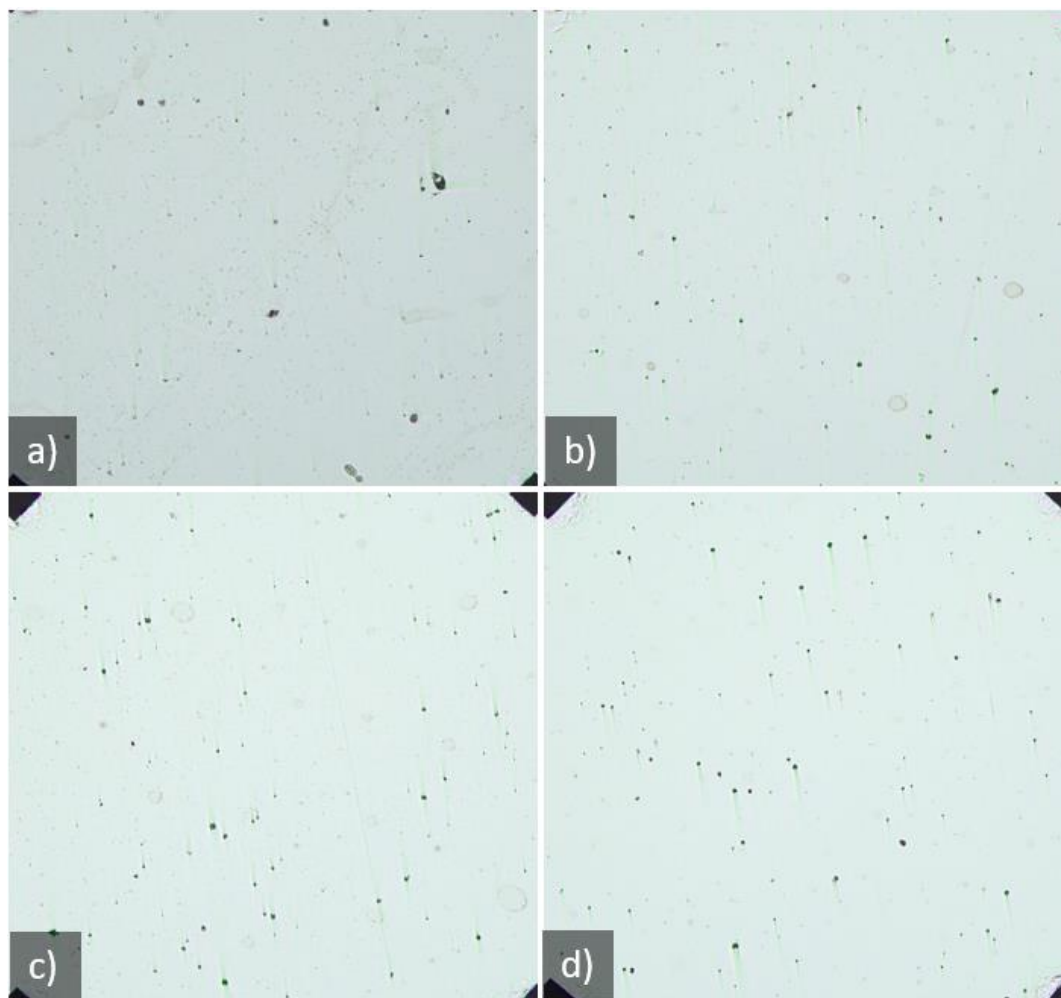


Figura 24. Zonas de recuento de inclusiones: (a) P1 – (b) P2 – (c) P3 – (d) P4

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 17 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

5 – DUREZA Y MICRODUREZA

Se midieron durezas en distintos puntos de las probetas, tanto en su superficie como en el seno del material. Para el material en el seno de la pieza, en la **Tabla 3** se muestran los resultados obtenidos en escala Rockwell B y C (según el rango de durezas de cada probeta) y su verificación mediante la medición de dureza Brinell. Estas mediciones se realizaron con un durómetro PETRI, propiedad del ITBA.

Rockwell B y Rockwell C				Brinell	
Probeta	Escala	Promedio	Desvío	Diámetro	HB
1	HRB	96,3	2,925	0,86	214
2	HRB	87,9	2,123	1,03	148
3	HRC	31,0	3,678	0,8	247
4	HRB	92,1	3,771	0,89	199

Tabla 3. Valores de dureza tomados en el seno del material, alejado de la superficie. Se tomaron mediciones en escala HRB, HRC y Brinell

En la **Tabla 4** se muestran los valores de dureza Brinell obtenidos para mediciones sobre la superficie de las probetas. Estas mediciones se realizaron con un durómetro KING, propiedad de Microwen.

Probeta	Escala	Número de Entalla			Promedio	Desvío
		1	2	3		
1	Brinell	255	248	255	252,7	4,041
2	Brinell	229	217	212	219,3	8,737
3	Brinell	363	341	341	348,3	12,702
4	Brinell	229	223	223	225,0	3,464

Tabla 4. Valores de dureza tomados en la superficie del material, en escala Brinell

Las microdurezas obtenidas en las distintas zonas de las piezas varían según la composición y microconstituyentes abarcados. En la siguiente **Tabla 5** se detallan las probetas, entallas y zonas para los resultados obtenidos. Los valores obtenidos confirman los microconstituyentes observados en las metalografías, ya que se condicen con las durezas obtenidas para cada uno de ellos.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 18 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

N° de entalla	Probeta	Microconstituyente/ zona	Valor	Escala	%error
1	P1	Zona descarburada (ferrita)	218,7	HV1	4
2	P1	Zona desc. + 0,5 mm	228,2	HV1	4
3	P1	Zona desc. + 1 mm	252,3	HV1	4
4	P1	Zona desc. + 1,5 mm	282,8	HV1	4
5	P1	Perlita gruesa	265,6	HV1	4
6	P1	Perlita fina	290,3	HV1	4
7	P1	Ferrita	259,0	HV1	4
8	P1	Bainita Superior	270,4	HV1	4
9	P2	Perlita gruesa + Ferrita	222,2	HV0,5	5
10	P2	Estructura general (norm.)	213,0	HV0,5	5
11	P2	Zona descarburada (ferrita)	174,4	HV0,5	5
12	P2	Zona desc. + 1 mm	229,1	HV0,5	5
13	P3	Martensita	449,8	HV0,5	5
14	P3	Zona descarburada (ferrita)	210,6	HV0,5	5
15	P3	Zona desc. + 0,5 mm	308,7	HV0,5	5
16	P3	Zona desc. + 1 mm	406,0	HV0,5	5
17	P4	Zona descarburada (ferrita)	217,0	HV0,5	5
18	P4	Zona desc. + 0,5 mm	229,8	HV0,5	5
19	P4	Zona desc. + 1 mm	239,9	HV0,5	5
20	P4	Martensita revenida	250,5	HV0,5	5

Tabla 5. Valores de microdureza obtenidos para cada probeta en zonas de interés, en escala Vickers HV0,5 y HV1 según el microconstituyente o zona medida

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 19 de 33

6 – TRACCIÓN

Se tornearon las probetas de geometría cilíndrica con zona calibrada de 50 mm de largo y 12,5 mm de diámetro. Para ello, se utilizó un torno CNC Haas provisto por el taller del ITBA. Las probetas se fabricaron siguiendo las especificaciones internas de Microwen para probetas de tracción de aceros E 4-003 Rev. 2. Las probetas se ensayaron en una máquina de ensayos de tracción SHIMADZU UH-300kNl, propiedad de Microwen, siguiendo los parámetros de ensayo predeterminados por la empresa para aceros API 60K.

Las probetas ensayadas se muestran en la **Figura 25**, donde se aprecian las zonas de rotura. Todas las probetas rompieron en la zona calibrada. Si bien la probeta P3 rompió cerca de una entalla realizada para la medición del alargamiento, los resultados fueron representativos del tipo de estructura y material estudiado.



Figura 25. Probetas cilíndricas de tracción ensayadas correspondientes a las muestras P1, P2, P3 y P4

El resumen de los resultados de cada probeta se muestra en la siguiente **Tabla 6**:

Probeta	Diámetro [mm]	L ₀ [mm]	Alargamiento [%]	Estricción [%]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	R
P1	12,6	50,4	4,96	7,78	759,54	544,95	1,39
P2	12,6	50,4	23,81	41,95	764,65	496,38	1,54
P3	12,6	50,4	4,17	9,30	1132,46	823,22	1,38
P4	12,6	50,4	24,21	52,32	688,22	552,58	1,25

Tabla 6. Resumen de resultados obtenidos para los ensayos de tracción realizados. Se muestran los valores de diámetro inicial, L₀, alargamiento %, estricción %, R_m, R_{p0,2} y R

En las **Figura 26**, **Figura 27**, **Figura 28** y **Figura 29** se muestran las curvas tensión-deformación obtenidas para cada probeta:

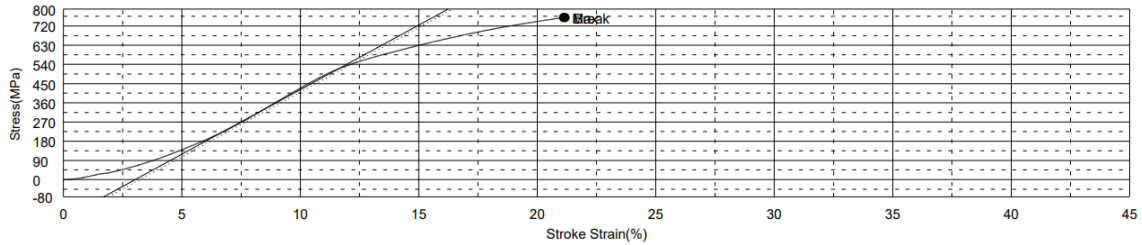


Figura 26. Diagrama Tensión-Deformación para P1

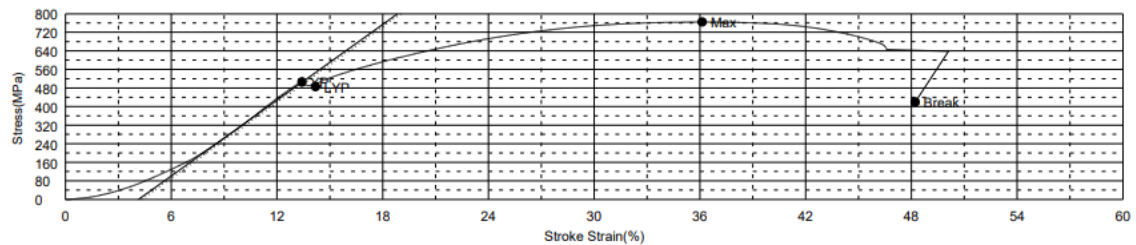


Figura 27. Diagrama Tensión-Deformación para P2

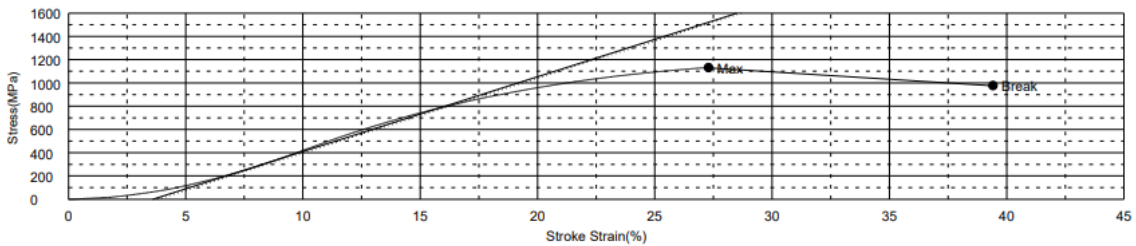


Figura 28. Diagrama Tensión-Deformación para P3

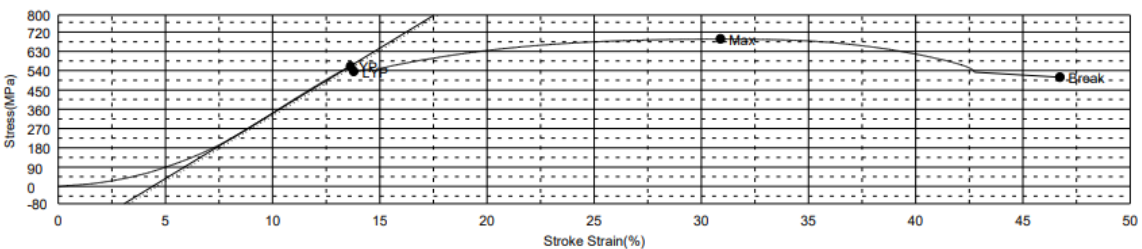


Figura 29. Diagrama Tensión-Deformación para P4

A continuación, en las **Figura 30** y **Figura 31** se comparan los valores de alargamiento porcentual, estricción porcentual, resistencia máxima y resistencia al 0,2% de deformación:

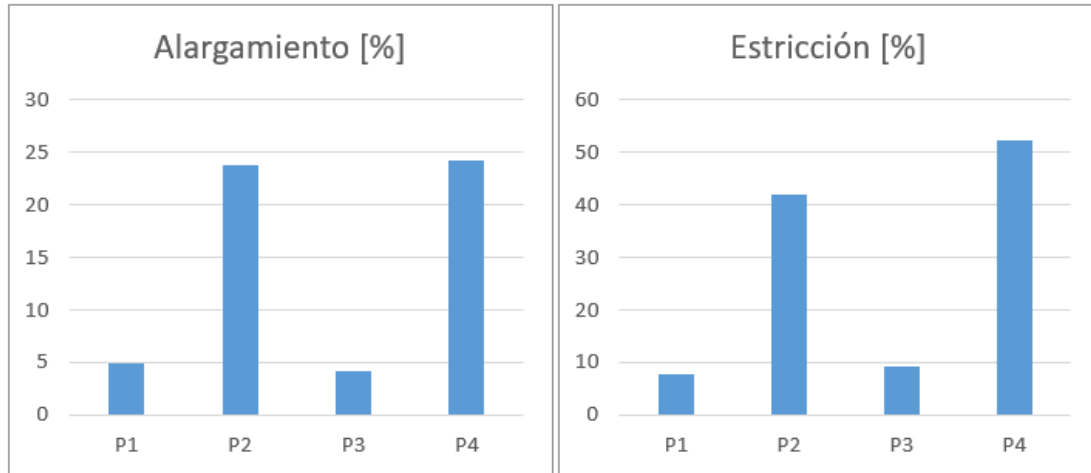


Figura 30. Alargamiento y estricción porcentuales para cada probeta ensayada

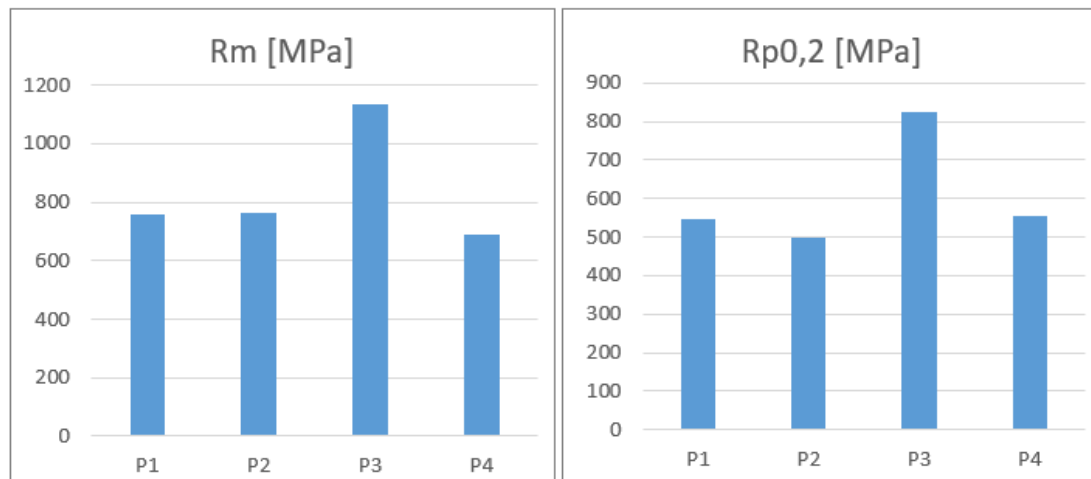


Figura 31. Resistencia máxima y al 0,2% de deformación para cada probeta ensayada

En la **Figura 32** se muestra la comparación entre probetas de los valores obtenidos:

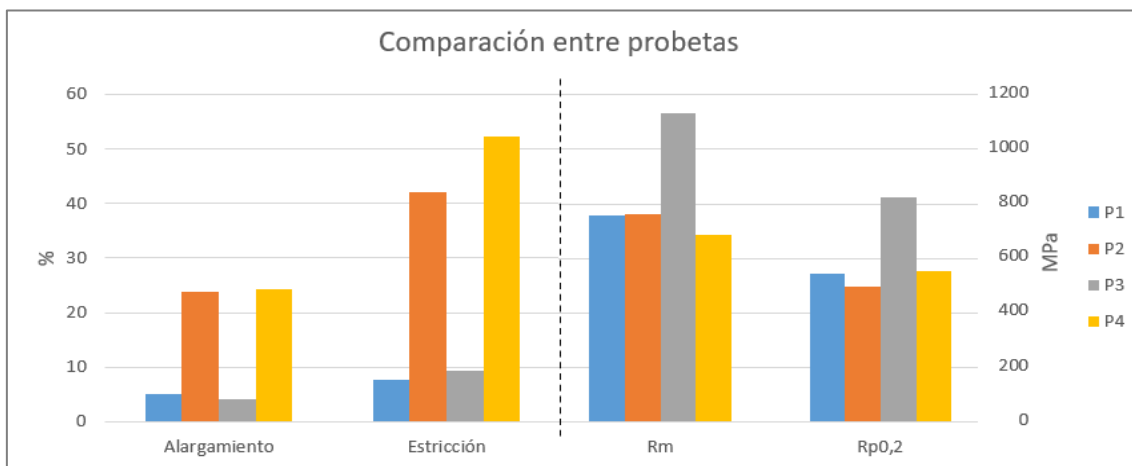


Figura 32. Comparación de valores de alargamiento y estricción %, Rm y Rp0,2 para cada probeta

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 22 de 33

7 – OBSERVACIÓN DE SUPERFICIE DE FRACTURA

Una vez traccionadas las probetas, se observaron las superficies de fractura de cada una para identificar los mecanismos de rotura. Para esto, se utilizó una lupa estereoscópica. A continuación en la **Figura 33** se muestran las imágenes obtenidas para cada probeta y la descripción del mecanismo de falla correspondiente. Todas las imágenes tienen un aumento x2.

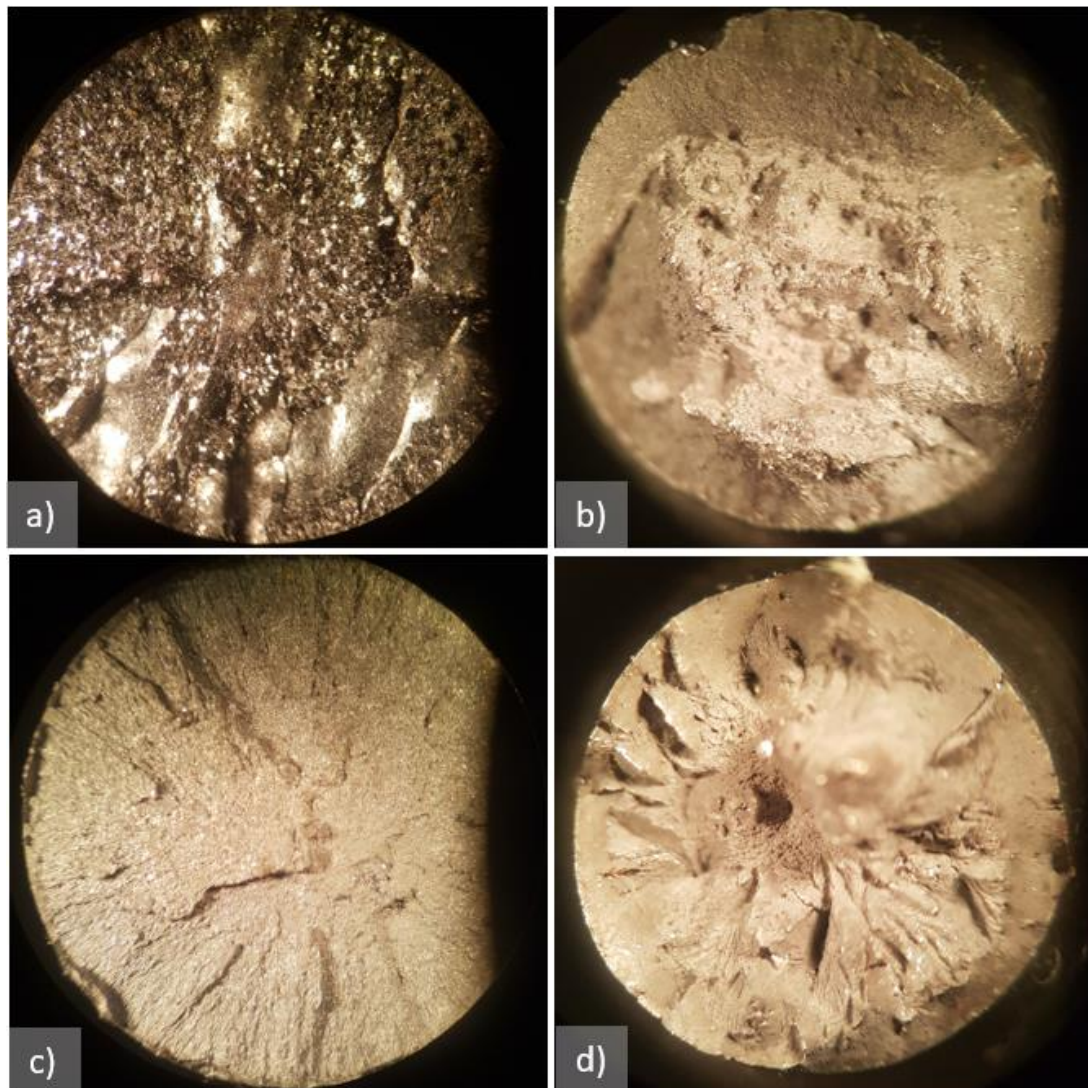


Figura 33. Superficies de fractura bajo lupa estereoscópica, aumento x2: (a) P1 – (b) P2 – (c) P3 – (d) P4

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 23 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

Para la probeta P1 (a), se observa una superficie en su mayor parte brillante indicando una fractura frágil generalizada con algunas zonas opacas deformadas localmente indicando fracturas dúctiles localizadas. Esto se debe a la heterogeneidad de microconstituyentes y tamaños de grano que dan lugar a nucleaciones de discontinuidades dispersas durante la fractura.

Para la probeta P2 (b), se observa una morfología de grano fino y homogéneo que resulta en una fractura dúctil con forma tipo copa-cono. Se pueden ver planos de rotura a 45° en el borde de la sección. También se observan distintos hoyuelos indicativos de zonas de nucleación de discontinuidades.

Para la probeta P3 (c), se observa una morfología de grano fino y homogéneo pero con características de fractura completamente frágil. Se pueden apreciar caminos de fisura en dirección radial sobre la sección y planos de clivaje sobre la superficie, con algunos bordes sobresalientes del plano de rotura.

Para la probeta P4 (d), se observa una superficie opaca indicando rotura dúctil con algunos picos brillantes indicando fracturas se secciones remanentes frágiles posteriores a la deformación y fractura del resto de la superficie. La sección presenta deformaciones sobresalientes con planos de rotura a 45° con respecto al plano transversal y en distintas direcciones.

8 – COMPOSICIÓN DE INCLUSIONES CON SEM-EDS

Se colocaron las probetas en un microscopio electrónico de barrido (SEM), propiedad del ITBA, para identificar inclusiones y obtener su composición con un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) conectado al mismo. A partir del análisis de distintas zonas de cada probeta se obtuvieron varios resultados, algunos similares entre sí. A continuación se detallan los resultados destacables entre los distintos sitios de análisis.

P1:

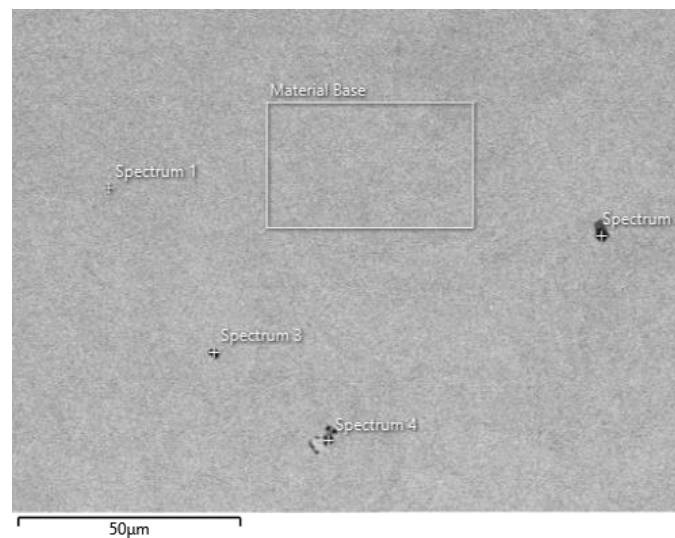
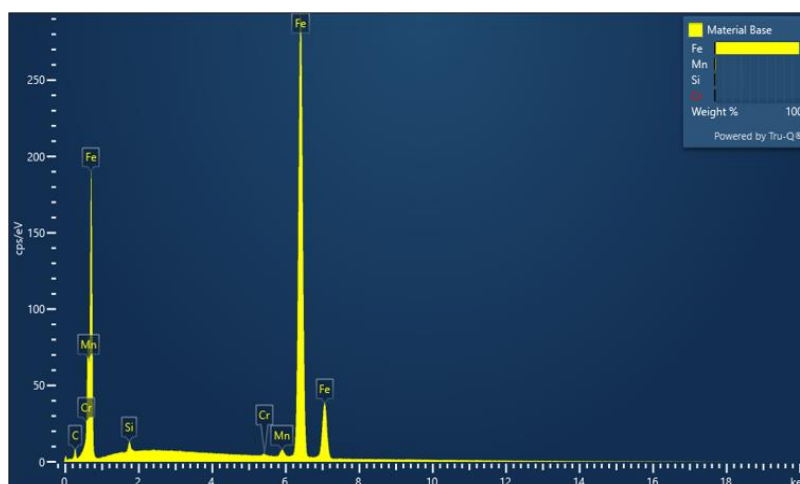
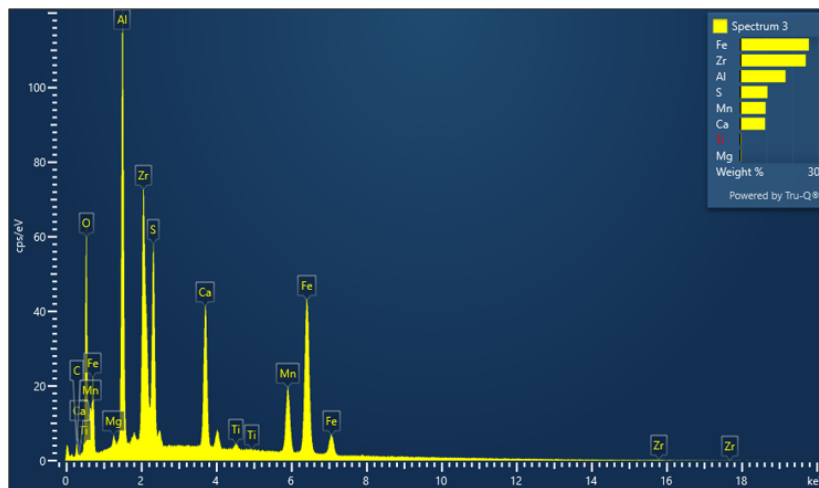


Figura 34. Se muestran las ubicaciones de los espectros analizados con EDS sobre la zona de análisis 1 para probeta P1



Element	Wt%
Si	0.64
Cr	0.22
Mn	1.31
Fe	97.83

Figura 35. Espectro obtenido para P1 zona 1 - Material Base. El espectro analizado mediante EDS para el material base resulta de una composición similar al obtenido anteriormente en la sección 2 mediante espectrómetro convencional para el contenido de hierro y sus aleantes principales



Element	Wt%
Mg	0.49
Al	17.45
S	10.48
Ca	9.61
Ti	0.51
Mn	9.78
Fe	26.46
Zr	25.22

Figura 36. Espectro obtenido para P1 zona 1 - Espectro 3. Se observan picos de Mg, Al, S, Ca, Ti, Mn, Zr y O

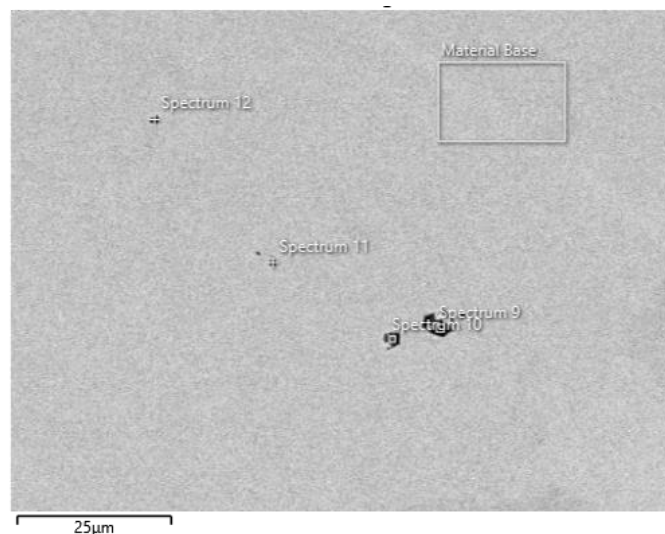
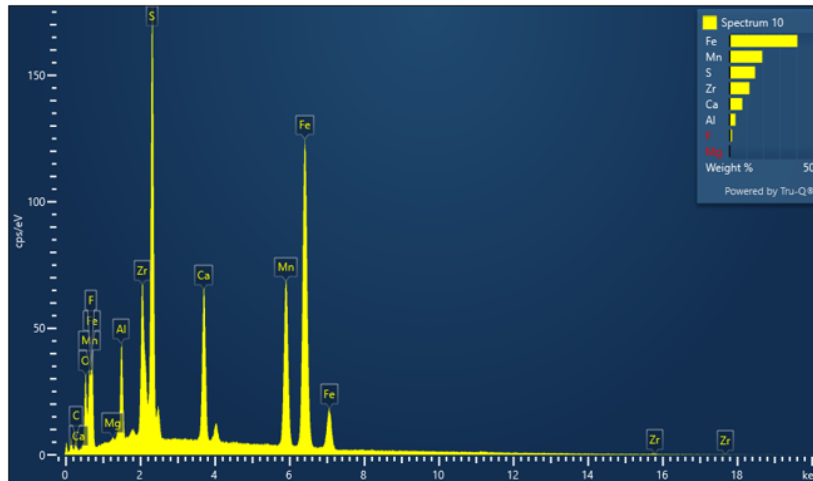
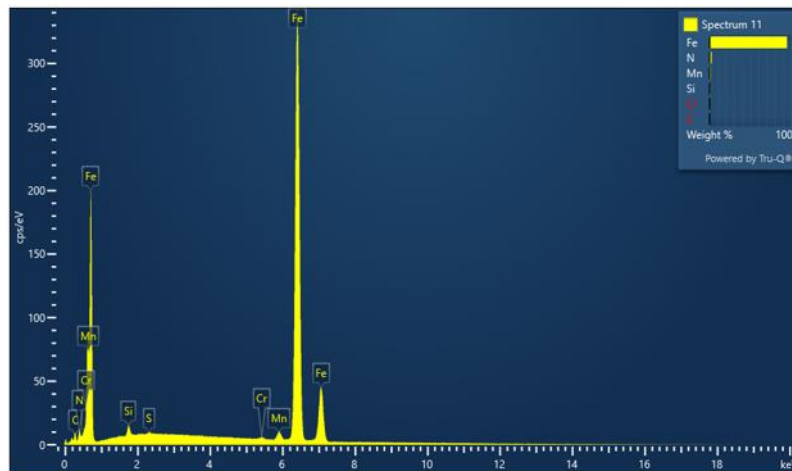


Figura 37. Se muestran las ubicaciones de los espectros analizados con EDS sobre la zona de análisis 2 para probeta P1



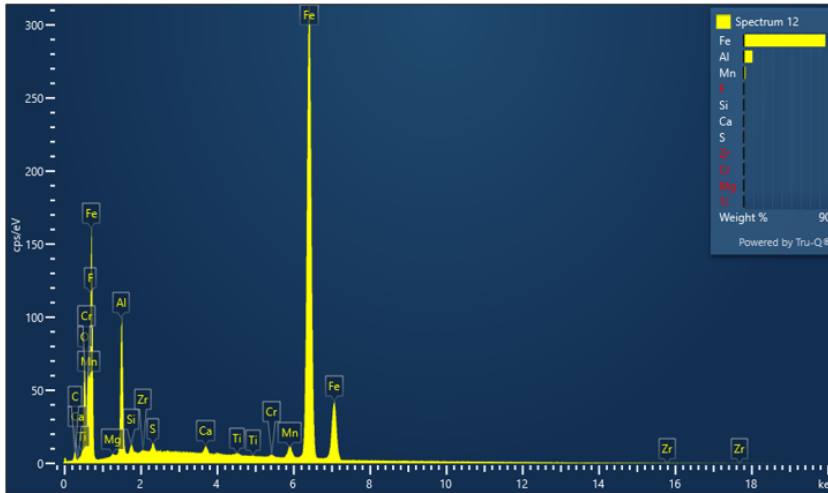
Element	Wt%
F	1.45
Mg	0.15
Al	3.55
S	15.22
Ca	7.60
Mn	19.56
Fe	40.62
Zr	11.84

Figura 38. Espectro obtenido para P1 zona 2 - Espectro 10. Se observan picos de F, Mg, Al, S, Ca, Mn y Zr



Element	Wt%
N	2.42
Si	0.68
S	0.10
Cr	0.21
Mn	1.51
Fe	95.09

Figura 39. Espectro obtenido para P1 zona 2 - Espectro 11. Se observan picos de N, Si, S, Cr y Mn



Element	Wt%
F	0.68
Mg	0.18
Al	9.26
Si	0.51
S	0.45
Ca	0.49
Ti	0.17
Cr	0.23
Mn	1.79
Fe	85.97
Zr	0.27

Figura 40. Espectro obtenido para P1 zona 2 - Espectro 12. Se observan picos de F, Mg, Al, Si, S, Ca, Ti, Cr, Mn y Zr

P2:

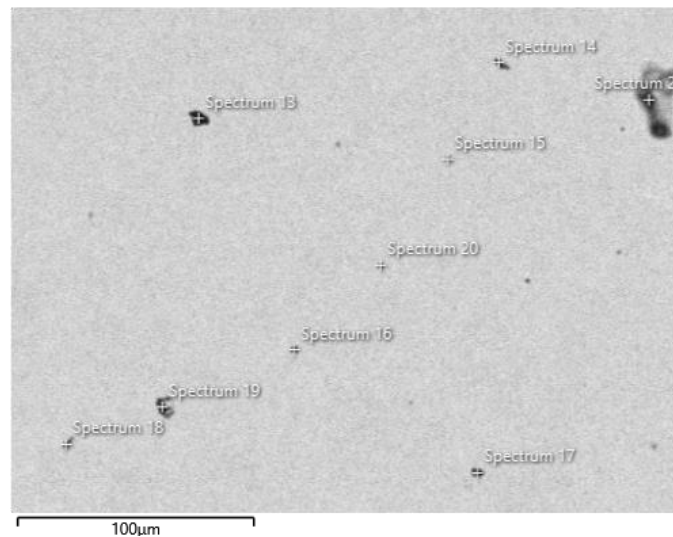
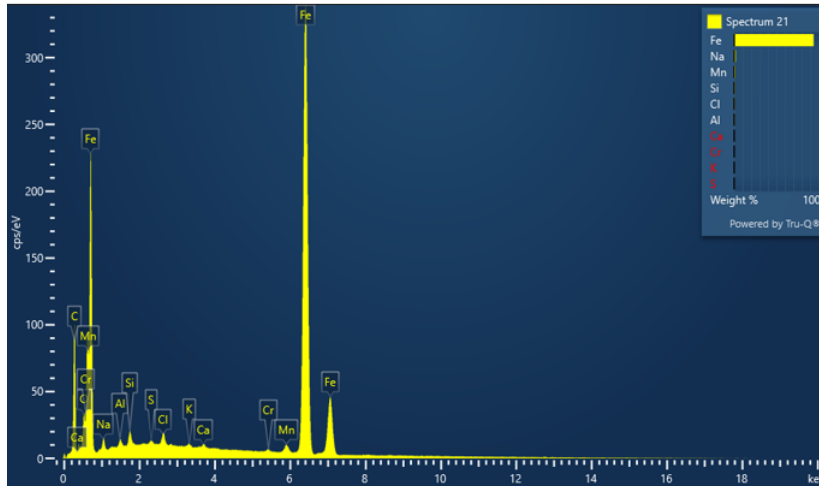


Figura 41. Se muestran las ubicaciones de los espectros analizados con EDS sobre la zona de análisis 1 para probeta P2



Element	Wt%
Na	1.80
Al	0.54
Si	0.87
S	0.21
Cl	0.69
K	0.21
Ca	0.24
Cr	0.23
Mn	1.33
Fe	93.88

Figura 42. Espectro obtenido para P2 zona 1 - Espectro 21. Se observan picos de Na, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Cr y Mn

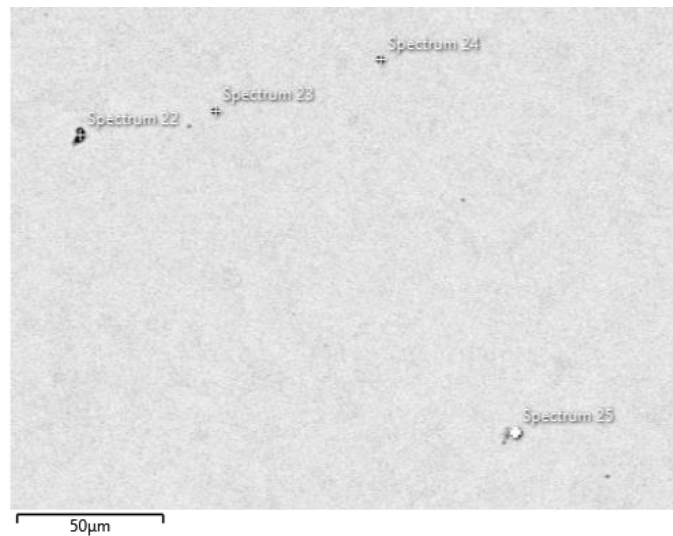


Figura 43. Se muestran las ubicaciones de los espectros analizados con EDS sobre la zona de análisis 2 para probeta P2

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	Pág. 29 de 33

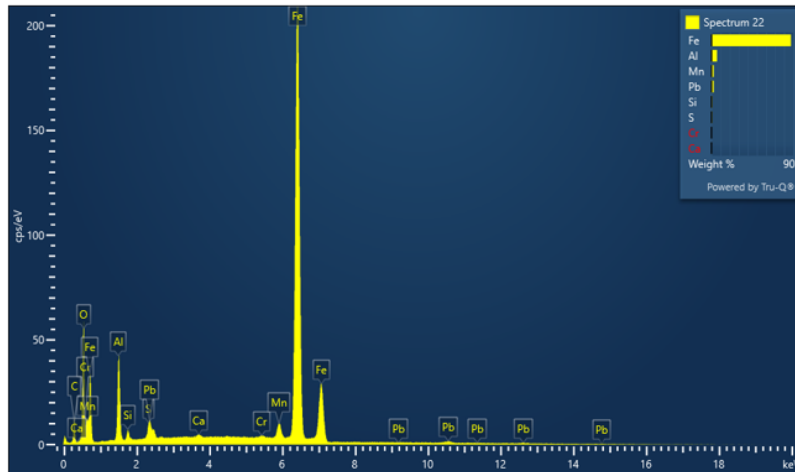


Figura 44. Espectro obtenido para P2 zona 2 - Espectro 22. Se observan picos de Al, Si, S, Ca, Cr, Mn y Pb

P3:

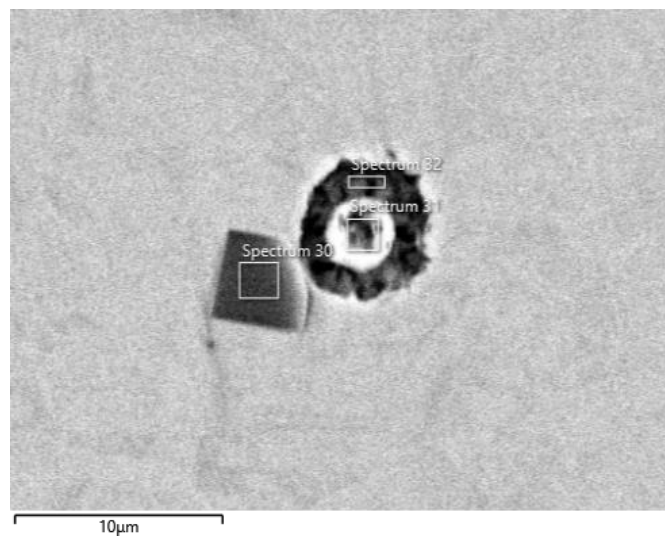
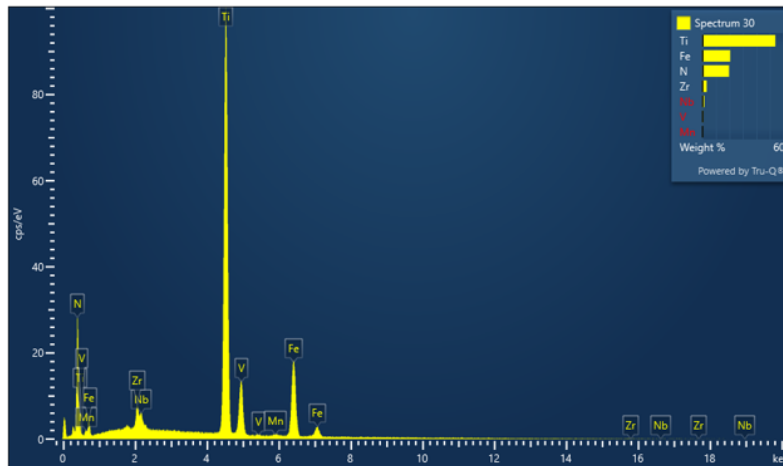
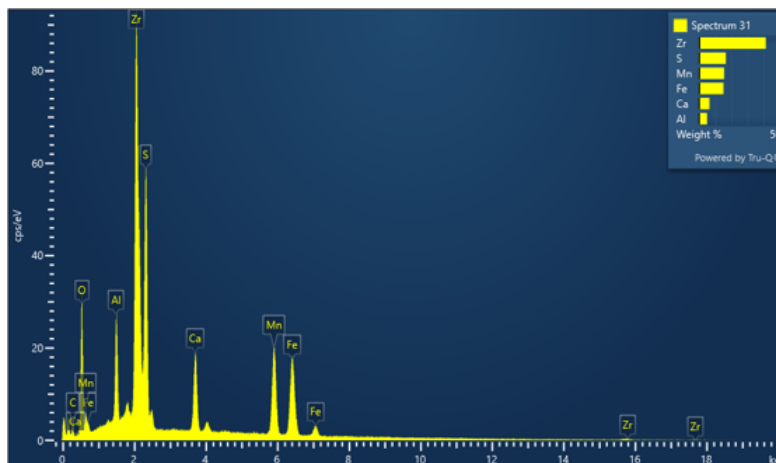


Figura 45. Se muestran las ubicaciones de los espectros analizados con EDS sobre la zona de análisis 1 para probeta P3



Element	Wt%
N	19.80
Ti	54.18
V	0.53
Mn	0.28
Fe	20.63
Zr	3.18
Nb	1.40

Figura 46. Espectro obtenido para P3 zona 1 - Espectro 30. Se observan picos de N, Ti, V, Mn, Zr y Nb



Element	Wt%
Al	4.90
S	16.62
Ca	6.41
Mn	15.49
Fe	15.13
Zr	41.46

Figura 47. Espectro obtenido para P3 zona 1 - Espectro 31. Se observan picos de Al, S, Ca, Mn y Zr

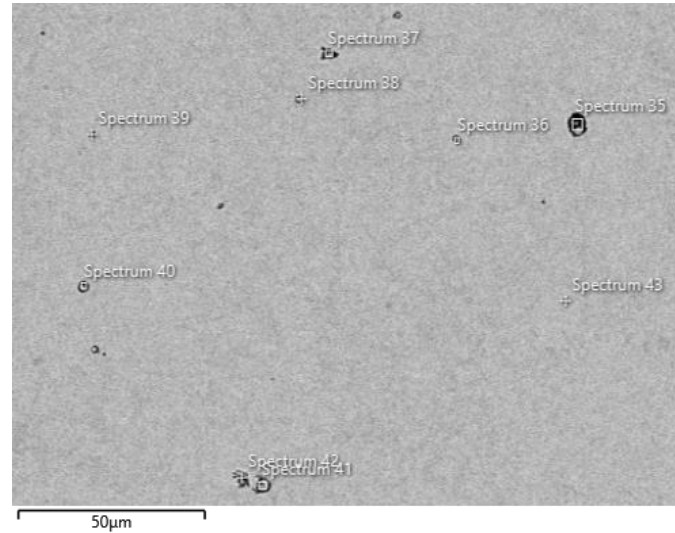


Figura 48. Se muestran las ubicaciones de los espectros analizados con EDS sobre la zona de análisis 2 para probeta P3

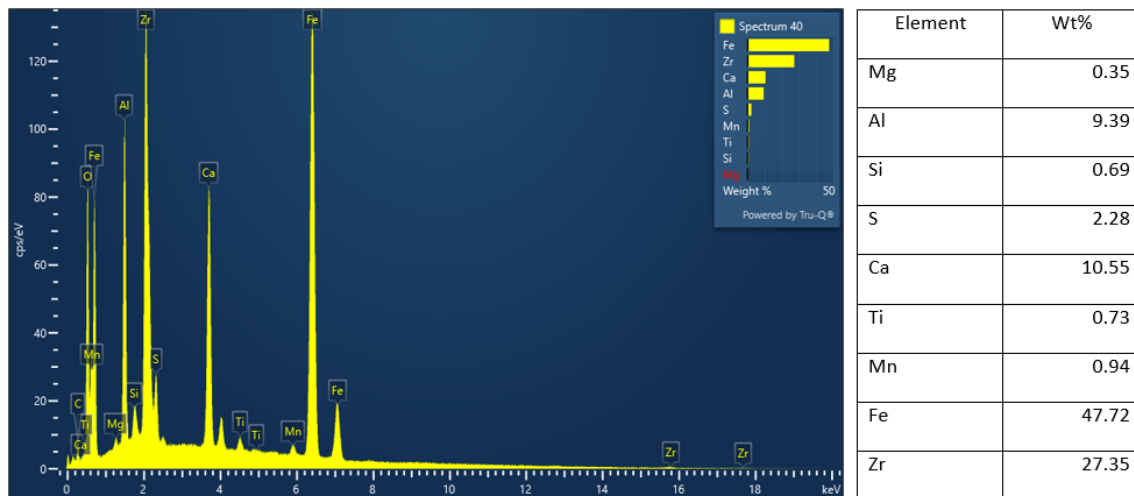


Figura 49. Espectro obtenido para P3 zona 2 - Espectro 40. Se observan picos de Mg, Al, Si, S, Ca, Ti, Mn, Zr y O

P4:

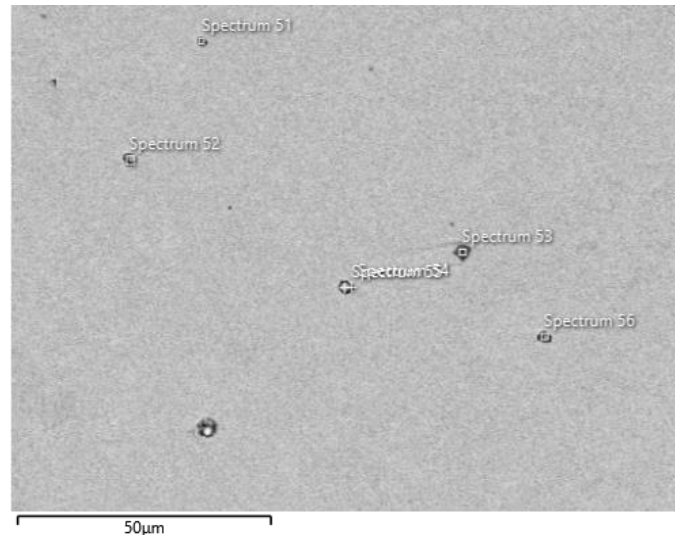


Figura 50. Se muestran las ubicaciones de los espectros analizados con EDS sobre la zona de análisis 1 para probeta P4

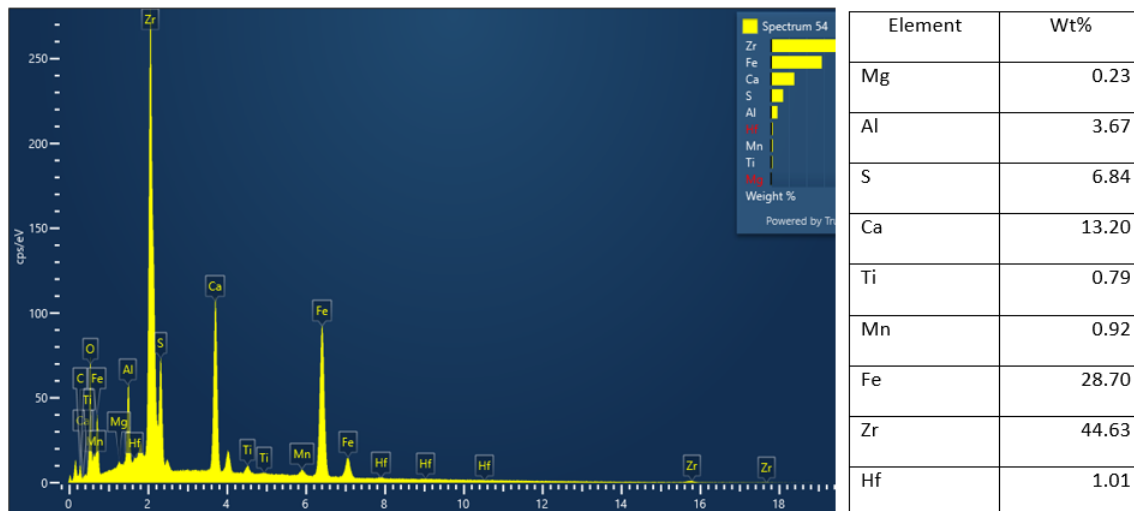


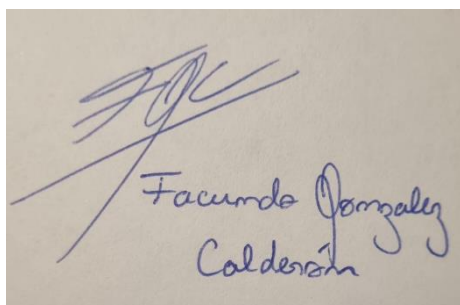
Figura 51. Espectro obtenido para P4 zona 1 - Espectro 54. Se observan picos de Mg, Al, s, Ca, Ti, Mn, Zr y Hf. El espectro de Hafnio (Hf) que se obtiene es similar al de Tantalio (Ta) siendo este último el más probable de aparecer en un acero del tipo analizado, por lo que se asume que corresponde a un espectro de emisión de Ta

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2022-00 Pág. 33 de 33
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A	

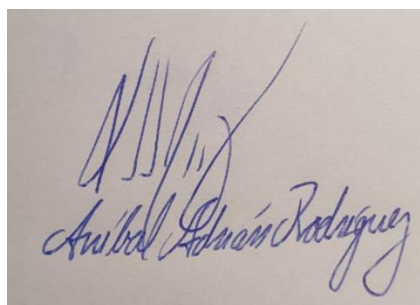
9 – CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado sobre las propiedades del acero aleado bajo norma API 6A tipo 60K, se concluye que los resultados obtenidos se corresponden a un material de ese tipo y cumplen con los parámetros establecidos por la norma. A continuación se enuncian los más importantes:

- Se encontró una excesiva cantidad de inclusiones, aunque es sabido que a diferencia de las probetas analizadas, en las piezas de fabricación comunes el acero pasa por un filtro que ayuda a prevenir estos niveles de tenores inclusionarios.
- Se corresponden los niveles de dureza obtenidos con el historial térmico de las piezas y sus microconstituyentes.
- Existe una zona de descarburación superficial en las piezas como efecto de una corrosión a alta temperatura debido a los tratamientos térmicos realizados.
- Los microconstituyentes encontrados en las metalografías fueron los esperados en cada etapa de fabricación del acero, siguiendo lo descrito en la teoría y sin desvíos aparentes.
- Los mecanismos de falla visualizados describen comportamientos normales de las microestructuras presentes en cada etapa, finalizando con un comportamiento adecuado a lo requerido por la norma API 6ª para un acero tipo 60K.



NOMBRE Y APELLIDO
REALIZÓ



NOMBRE Y APELLIDO
APROBÓ

“El laboratorio certifica que resultados informados corresponden a las muestras recibidas en su laboratorio. El laboratorio no comunicará a terceros ni publicará los resultados de los ensayos, análisis, pruebas o estudios encomendados por terceros, pero se reserva el derecho de utilizar los resultados, sin individualizar, con fines exclusivamente estadísticos, para uso interno y/o académicos”

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 1 de 26

DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	
Nombre/Razón social de solicitante	Microwen
Documento asociado	
Fecha de fabricación de muestras	14-03-2022
Fecha de redacción del informe	06-01-2023
Ensayos realizados	Composición química, Macrografía, Metalografía, Dureza, Gradiente de dureza, Tracción, Observación de superficie de fractura, Impacto Charpy, Jominy
Descripción de la muestra	Acero fundido de baja aleación API 60K en grado A (estándar) y grado C (símil 4330)
Identificación de la/s muestra/s	Colada 2: P5 a P13 Colada 3: P14 a P23

Índice de contenidos

1 – MUESTRAS.....	2
2 – COMPOSICIÓN QUÍMICA	3
3 – MACROGRAFÍA	3
4 – METALOGRAFÍA	3
5 – DUREZA Y GRADIENTE DE DUREZA.....	10
6 – TRACCIÓN	14
7 – OBSERVACIÓN DE SUPERFICIE DE FRACTURA	15
8 – IMPACTO CHARPY	17
9 – TEMPLABILIDAD JOMINY	18
10 – CONCLUSIONES	19

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 2 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	

1 – MUESTRAS

Las muestras fueron extraídas de dos coladas de fundición de acero de baja aleación “60K” según norma API 6A, una con aleantes típicos de producción y otra con modificaciones en las cantidades de Cr, Ni y Mo. Corresponden a un acero hipoeutectoide de baja aleación. Las probetas obtenidas fueron coladas en probeteros tipo doble lomo y tipo Keel Block (ver **Figura 1**) de radio 42 y 60 mm con el objetivo de evaluar la influencia de los espesores de piezas en las propiedades mecánicas. Se sacaron muestras de acero colado normalizado y acero colado templado y revenido, contrastándolos con el producto bruto de colada.

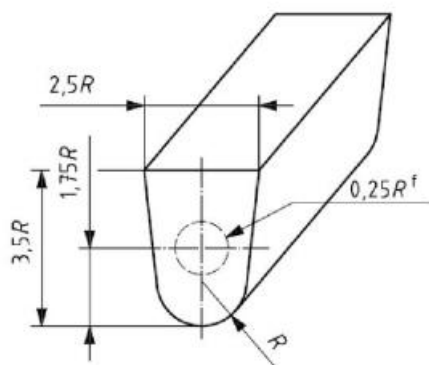


Figura 1. Plano de probetero tipo Keel Block según norma API 6A

En la siguiente **Tabla 1** se detallan los datos de las muestras, probeteros y coladas obtenidos para los ensayos. Los tratamientos térmicos se referencian como: AC (As Cast o bruto de colada), N (Normalizado), NTR (Normalizado, Templado y Revenido).

Tipo de probetero	Colada N°	Aleación	Muestra N°	Tratamiento Térmico
Doble lomo ASTM	MW 7877	60K Gr.A	5	AC
Doble lomo ASTM	MW 7877	60K Gr.A	6	N
			7	NTR
Keel Block R42	MW 7877	60K Gr.A	8	AC
Keel Block R42	MW 7877	60K Gr.A	9	N
Keel Block R42	MW 7877	60K Gr.A	10	NTR
Keel Block R60	MW 7877	60K Gr.A	11	AC
Keel Block R60	MW 7877	60K Gr.A	12	N
Keel Block R60	MW 7877	60K Gr.A	13	NTR
Doble lomo ASTM	MW 7925	60K Gr.C	14	AC
Doble lomo ASTM	MW 7925	60K Gr.C	16	N
			17	NTR
Keel Block R42	MW 7925	60K Gr.C	18	AC
Keel Block R42	MW 7925	60K Gr.C	19	N
Keel Block R42	MW 7925	60K Gr.C	20	NTR
Keel Block R60	MW 7925	60K Gr.C	21	AC
Keel Block R60	MW 7925	60K Gr.C	22	N
Keel Block R60	MW 7925	60K Gr.C	23	NTR

Tabla 1. Detalle de muestras por tipo de probetero, colada, aleación y tratamiento térmico

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 3 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	

2 – COMPOSICIÓN QUÍMICA

Se analizó la composición química de ambas coladas, promediando los valores entre muestras de la misma colada extraídas de varios probeteros. Se utilizó un espectrómetro SPECTROMAX, propiedad de Microwen. La composición se muestra en la *Tabla 2*.

Colada	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
Gr. A	0,32	0,66	1,36	0,020	0,002	0,06	0,08	0,007	0,04
Gr. C	0,31	0,79	0,84	0,018	0,001	0,80	0,48	0,19	0,04

Tabla 2. Composición química como % en masa, obtenida mediante espectrómetro

3 – MACROGRAFÍA

Se cortaron y observaron las muestras. No se encontraron evidencias de poros o defectos de colada en ningún plano de corte en ninguna de las muestras.

4 – METALOGRAFÍA

Se prepararon y observaron las muestras en un microscopio óptico ZEISS Axiovert A1 con distintos aumentos: x50, x100, x200 y x500. A continuación se muestran las morfologías observadas para cada muestra.

P5:

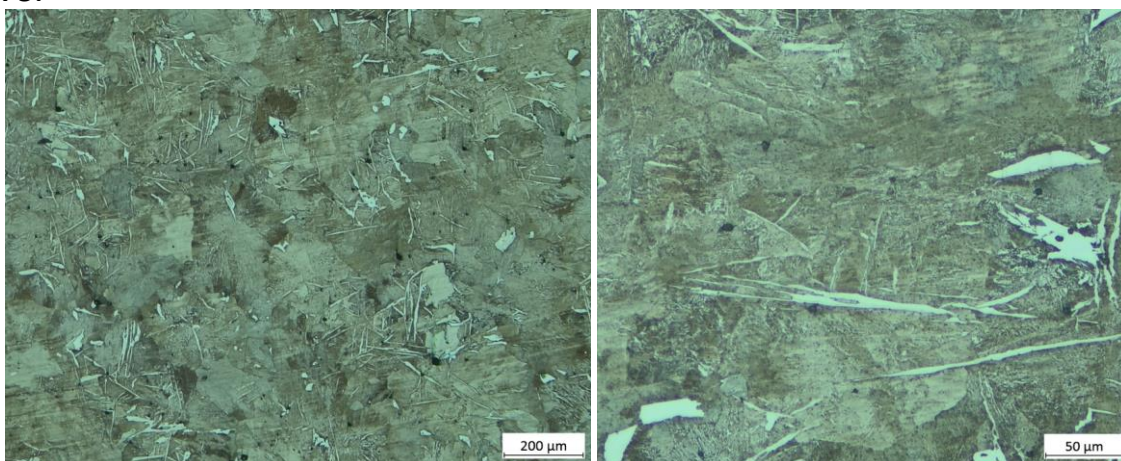


Figura 2. Se observa una estructura de grano heterogénea tanto en composición como en tamaño

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 4 de 26

P6:

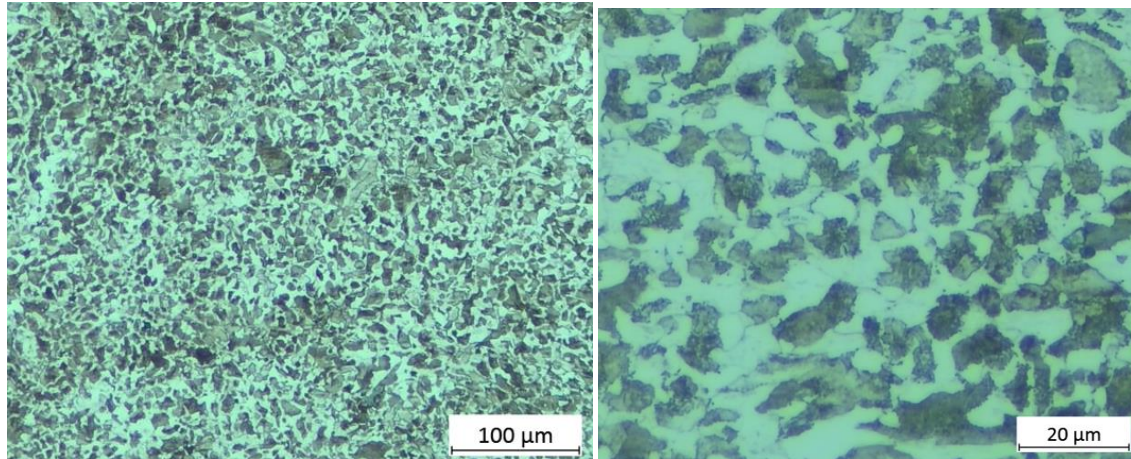


Figura 3. Se observan cristales de ferrita, perlita y bainita superior, donde en granos de perlita gruesa se resuelven láminas de cementita

P7:

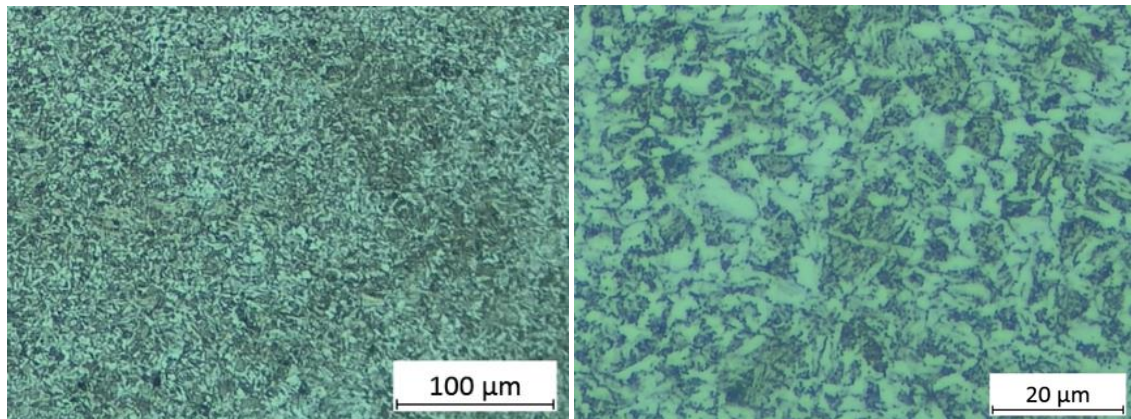


Figura 4. Se observa una estructura fina y homogénea, característica de la martensita revenida

P8:

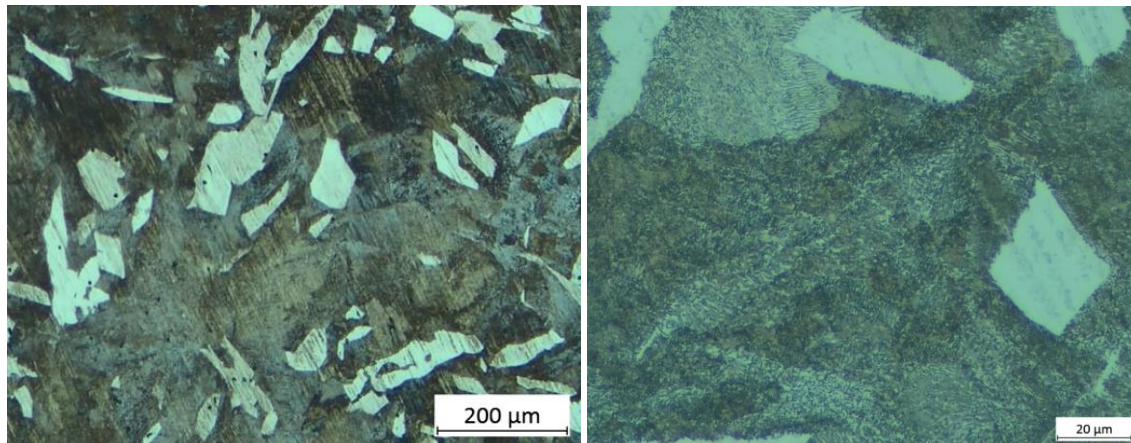


Figura 5. Se observa una estructura de grano heterogénea en composición, siendo esta de mayor tamaño que en la Figura 2. Esto resulta de un enfriamiento más lento, propio de una pieza de mayor espesor

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 5 de 26

P9:

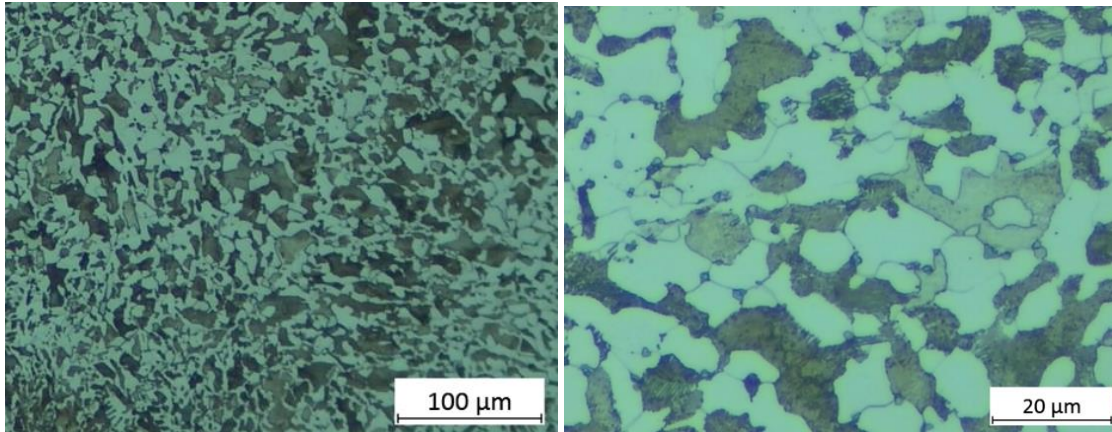


Figura 6. Estructura homogénea compuesta por ferrita y perlita, indica estructura normalizada

P10:

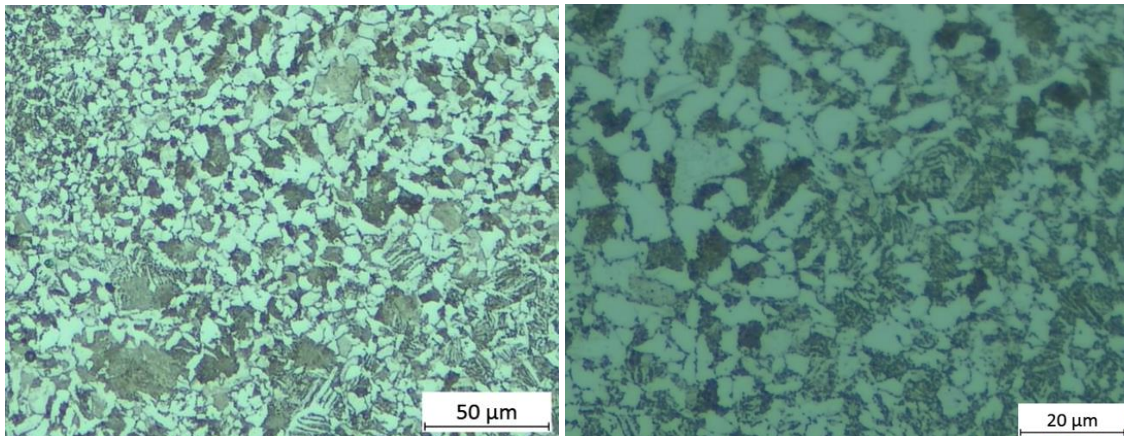


Figura 7. Se observa una estructura fina y homogénea. La pieza fue templada y revenida, aunque la remanencia de granos de bainita y ferrita indica que no se alcanzó a transformar del todo la estructura

P11:

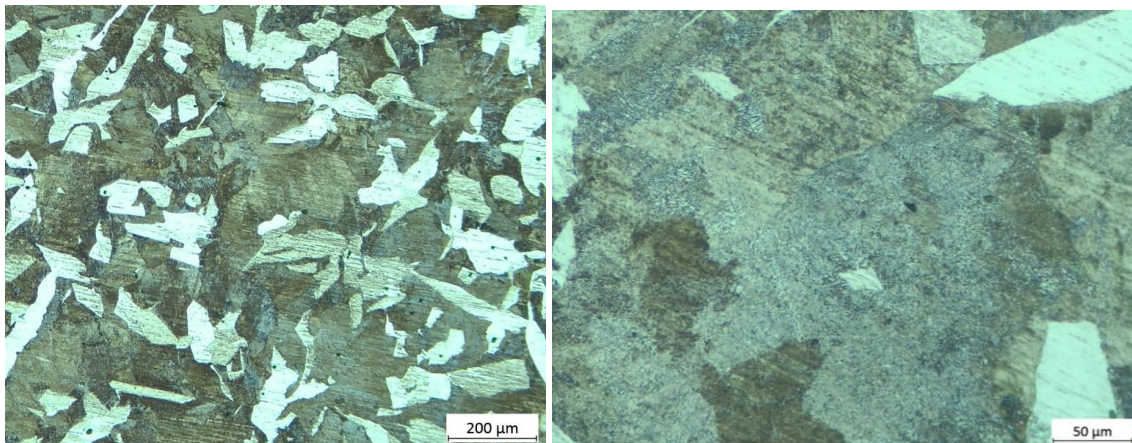


Figura 8. Estructura propia de bruto de colada, con grano de tamaño grande en comparación a la Figuras 2 y similar a la Figura 8.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 6 de 26

P12:

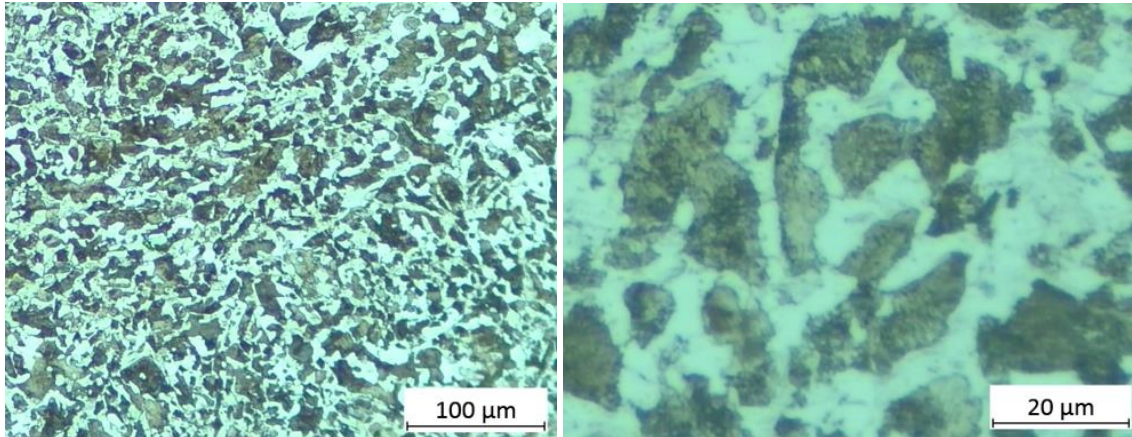


Figura 9. Se observa una estructura compuesta de ferrita y perlita con una distribución uniforme, propia de una pieza normalizada

P13:

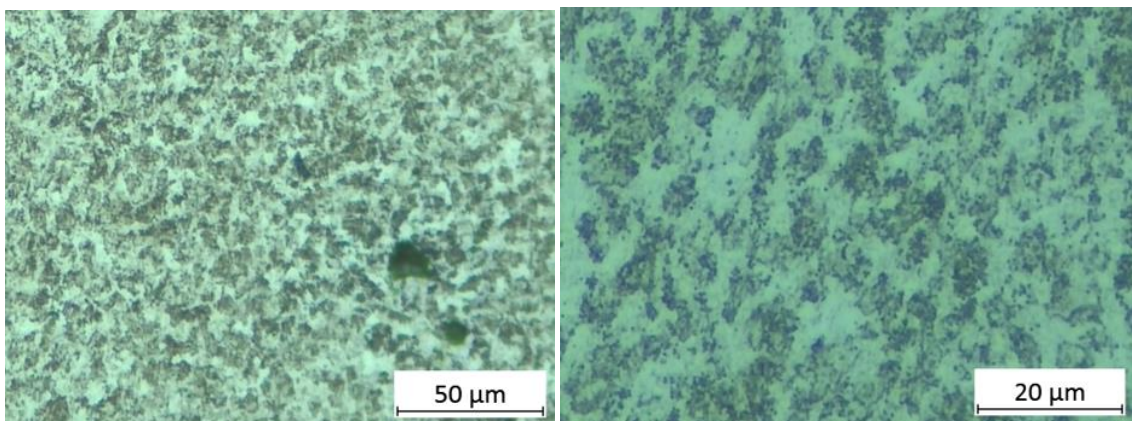


Figura 10. Se observa una estructura homogénea y fina de martensita revenida

P14:

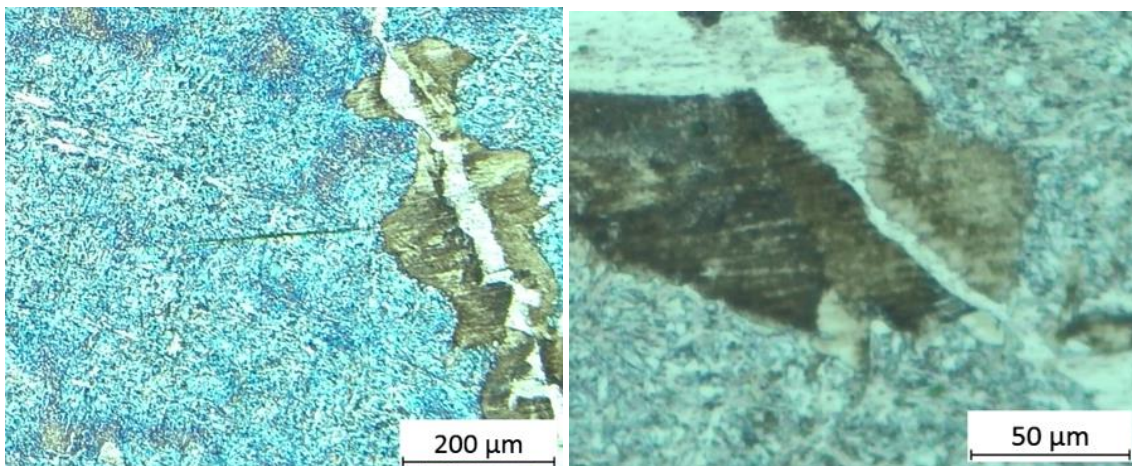


Figura 11. Se puede ver una acumulación de ferrita en borde de grano, con segregación hacia el mismo dejando una estructura homogénea en el interior

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 7 de 26

P16:

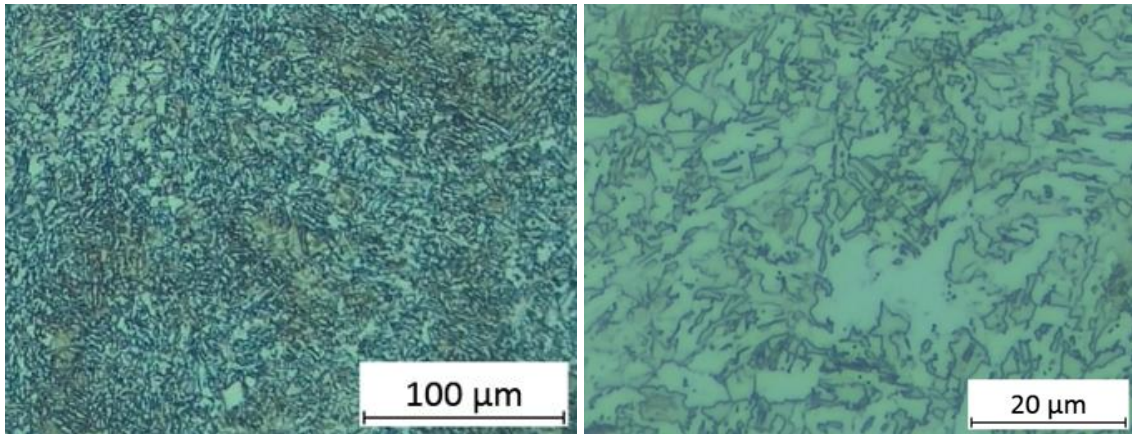


Figura 12. Se observa una estructura típica normalizada, más fina y pareja en comparación a las Figuras 6, 9 y 12 debido a la mayor carga de aleantes en el material

P18:

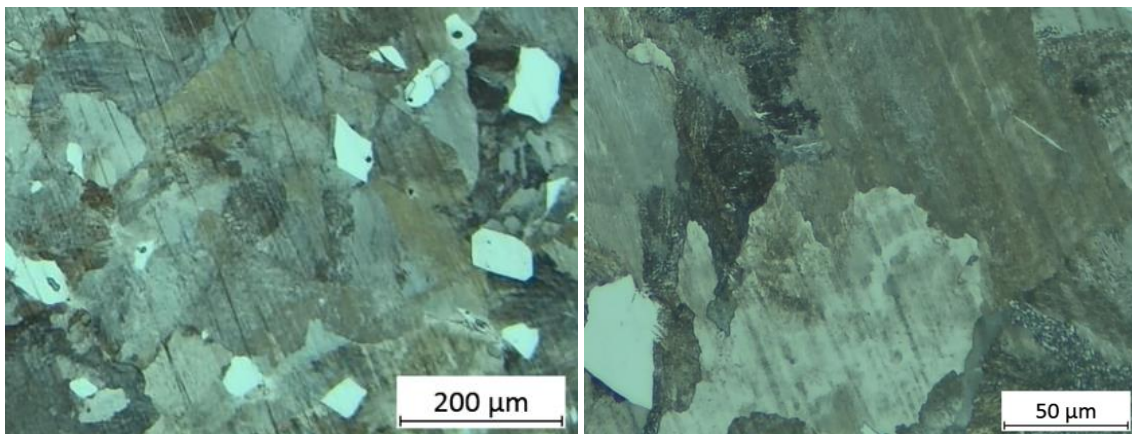


Figura 13. Se observa una estructura típica de bruto de colada, con mezcla de ferrita, perlita gruesa y fina y, en menor cantidad, bainita

P19:

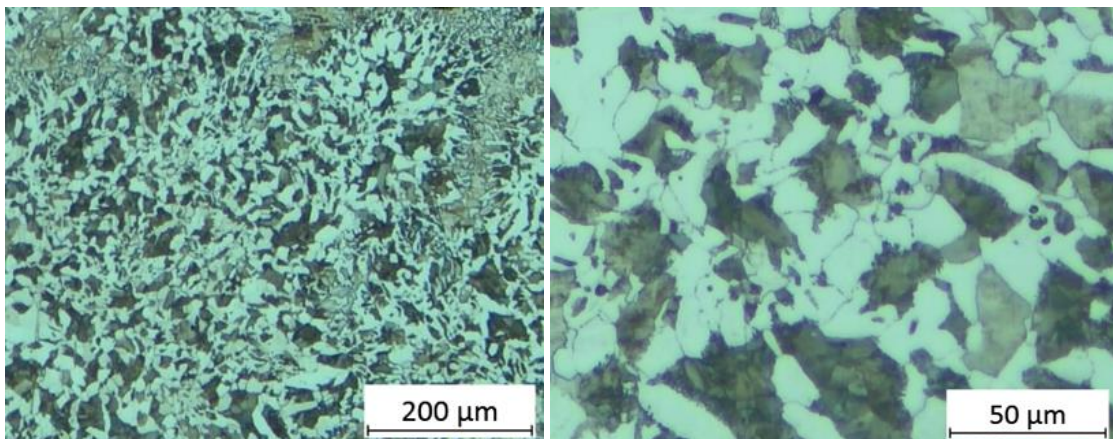


Figura 14. Se observa una estructura normalizada, compuesta por ferrita y perlita de grano fino y repartido homogéneamente

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 8 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	

P20:

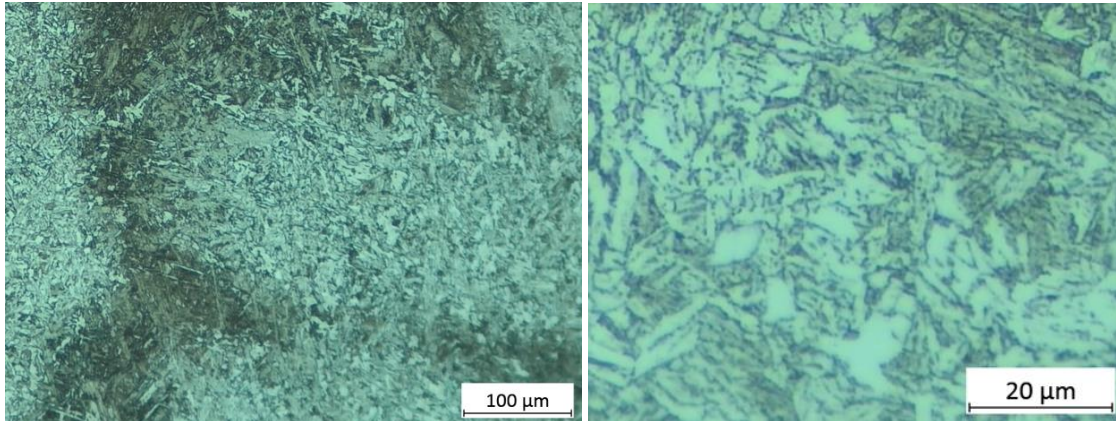


Figura 15. Se observa una estructura revenida que mantiene la orientación preferencial de los antiguos granos de martensita con austenita retenida. También se nota una segregación de aleantes en antiguos bordes de grano

P21:

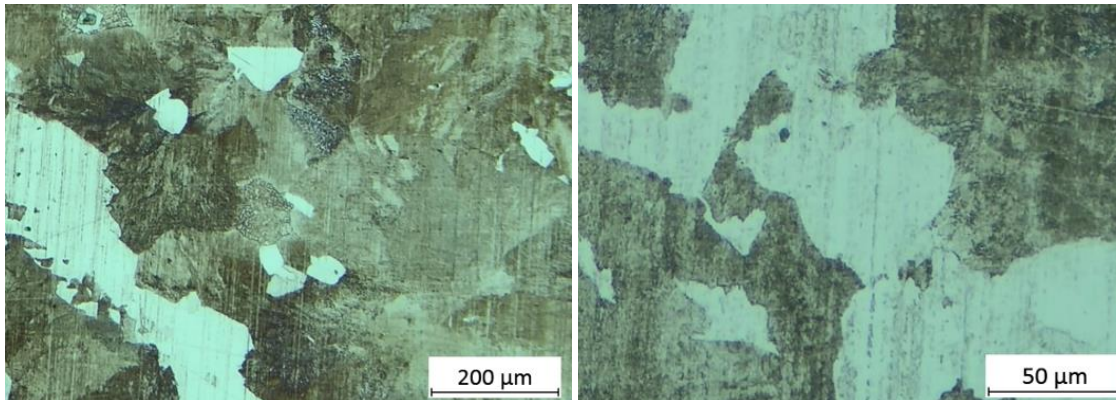


Figura 16. Se observa una estructura bruta de colada, de grano grueso en comparación a la Figuras 11 y 13 evidenciando un enfriamiento más lento de la pieza.

P22:

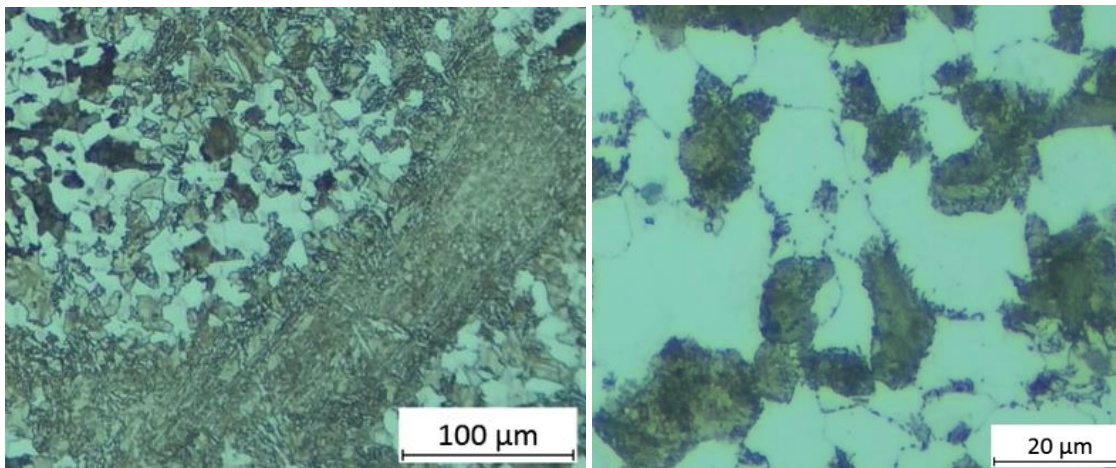


Figura 17. Se observa una estructura normalizada con segregación de aleantes hacia antiguos bordes de grano, dejando una mayor cantidad de ferrita en el interior

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 9 de 26

P23:

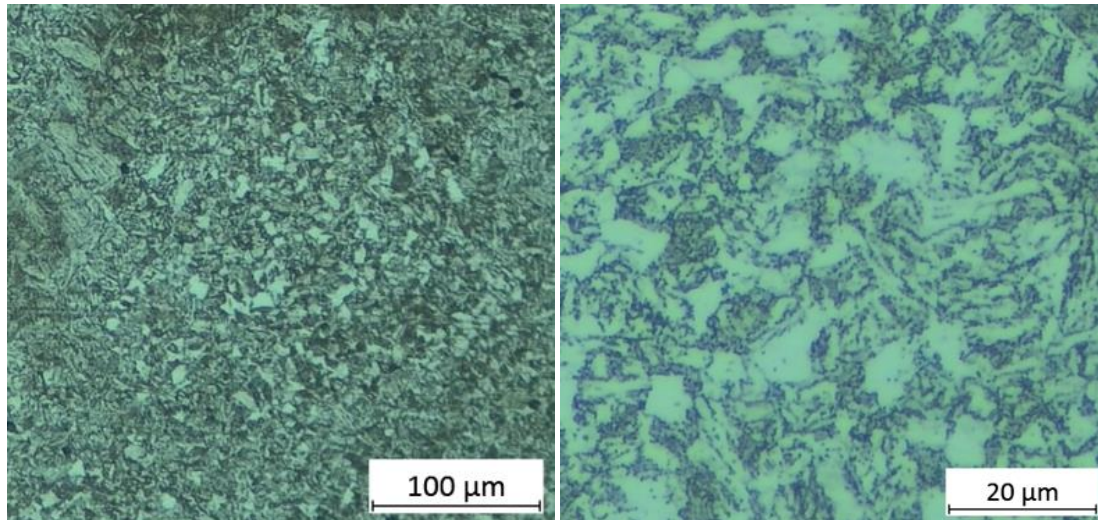


Figura 18. Se observa una estructura revenida con austenita retenida, homogénea y fina en su composición

5 – DUREZA Y GRADIENTE DE DUREZA

Se midieron durezas en distintas probetas, cada una representativa de un tratamiento térmico y espesor de pieza para cada colada.

COLADA 2:

En la **Tabla 3** se muestran los resultados obtenidos de dureza Brinell realizado con esfera de diámetro 5 mm, precarga de 10 kg y carga de 125 kg. Estas mediciones se realizaron con un durómetro PETRI, propiedad del ITBA. En la **Figura 19** se muestra un resumen de resultados comparativo.

Probeta	Escala	Promedio	Desvío
5	HB	147,7	7,0
6	HB	178,7	5,7
7	HB	182,4	5,9
8	HB	179,9	5,7
9	HB	155,3	3,4
10	HB	151,4	2,9
11	HB	156,3	1,7
12	HB	177,4	3,7
13	HB	154,5	8,9

Tabla 3. Valores de dureza Brinell para probetas de colada 2 (60K Gr.A)

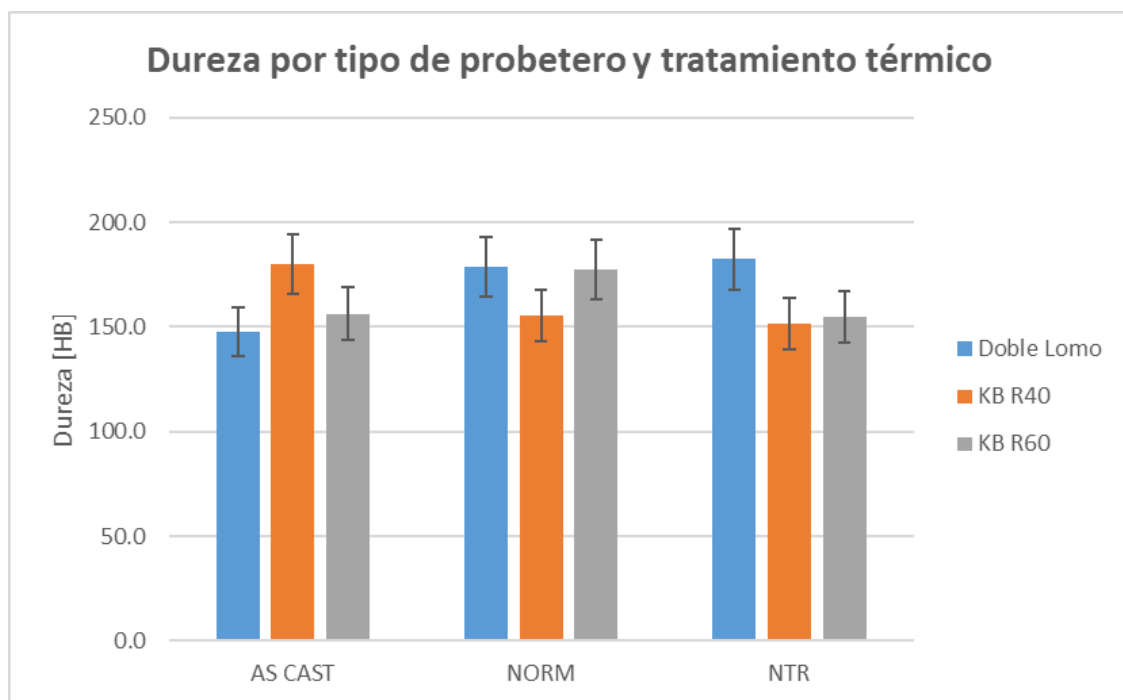


Figura 19. Resumen comparativo de resultados de dureza por tipo de probetero y TT para probetas de colada 2 (60K Gr.A)

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 11 de 26

En la **Tabla 4** se muestran los valores de gradiente de dureza Rockwell B con precarga de 10 kg y carga de 100 kg para las muestras extraídas de probeteros Keel block. Estas mediciones se realizaron con un durómetro PETRI, propiedad del ITBA. En la **Figura 20** se muestra un resumen de resultados comparativo.

Probeta N°	Radio KB	Valor de dureza HRB @distancia al borde del KB en mm											
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
9	42	90.9	91.2	91.4	90.1	91.9	91.3	90.5	89.8	-	-	-	-
10	42	86.7	88.6	88.0	84.9	85.7	86.9	87.9	88.0	-	-	-	-
12	60	86.7	88.6	92.8	91.1	91.0	90.6	89.2	90.4	88.8	87.6	86.9	86.5
13	60	89.4	90.5	90.6	89.1	90.0	89.0	88.5	87.3	86.7	87.0	86.6	87.9

Tabla 4. Valores del gradiente de durezas Brinell de las probetas Keel block con distinto radio (60K Gr.A)

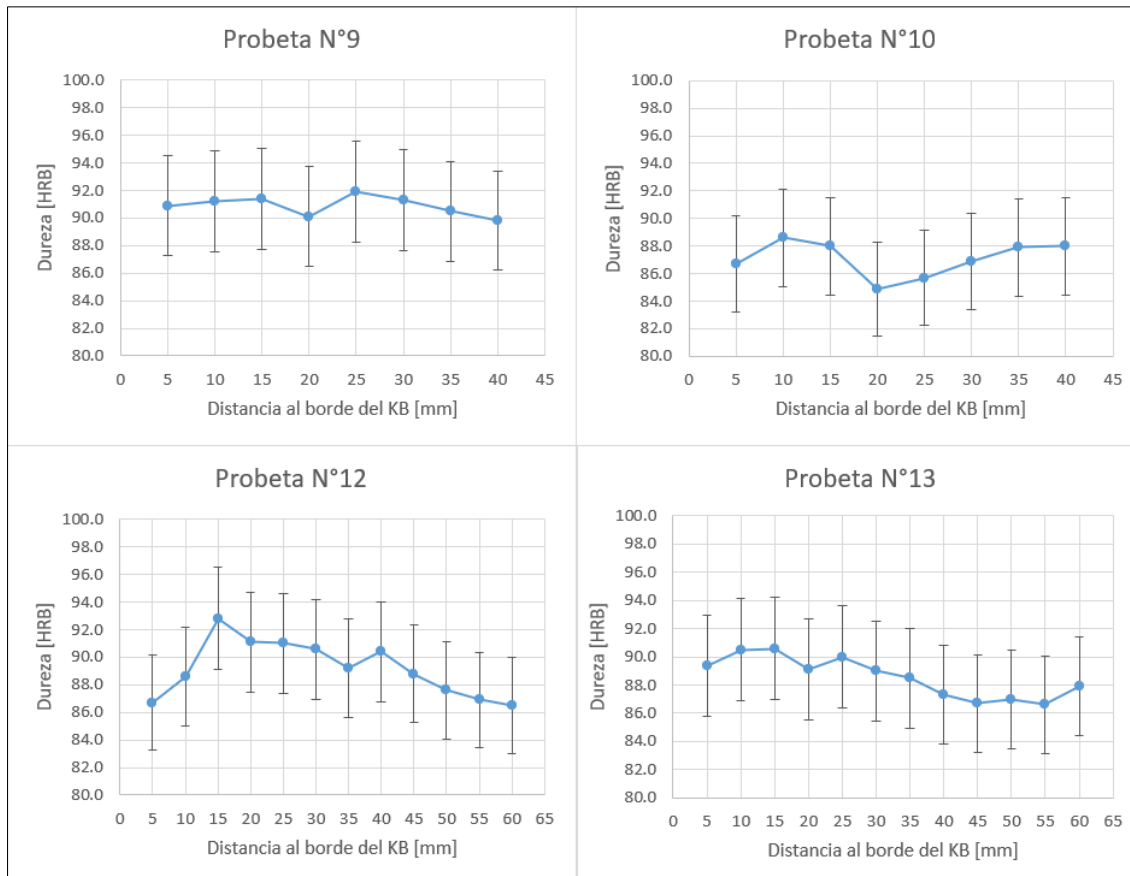


Figura 20. Resumen comparativo de resultados de gradiente de dureza para probetero KB colada 2 (60K Gr.A)

COLADA 3:

En la **Tabla 5** se muestran los resultados obtenidos de dureza Brinell realizado con esfera de diámetro 5 mm, precarga de 10 kg y carga de 125 kg. Estas mediciones se realizaron con un durómetro PETRI, propiedad del ITBA. En la **Figura 21** se muestra un resumen de resultados comparativo.

	INFORME DE ENSAYO		Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 12 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C		

Probeta	Escala	Promedio	Desvío
14	HB	235,1	17,2
16	HB	234,5	3,2
18	HB	206,3	12,4
19	HB	181,2	7,5
20	HB	217,4	12,5
21	HB	190,7	14,4
22	HB	186,2	4,5
23	HB	222,2	7,9

Tabla 5. Valores de dureza Brinell para probetas de colada 2 (60K Gr.C)

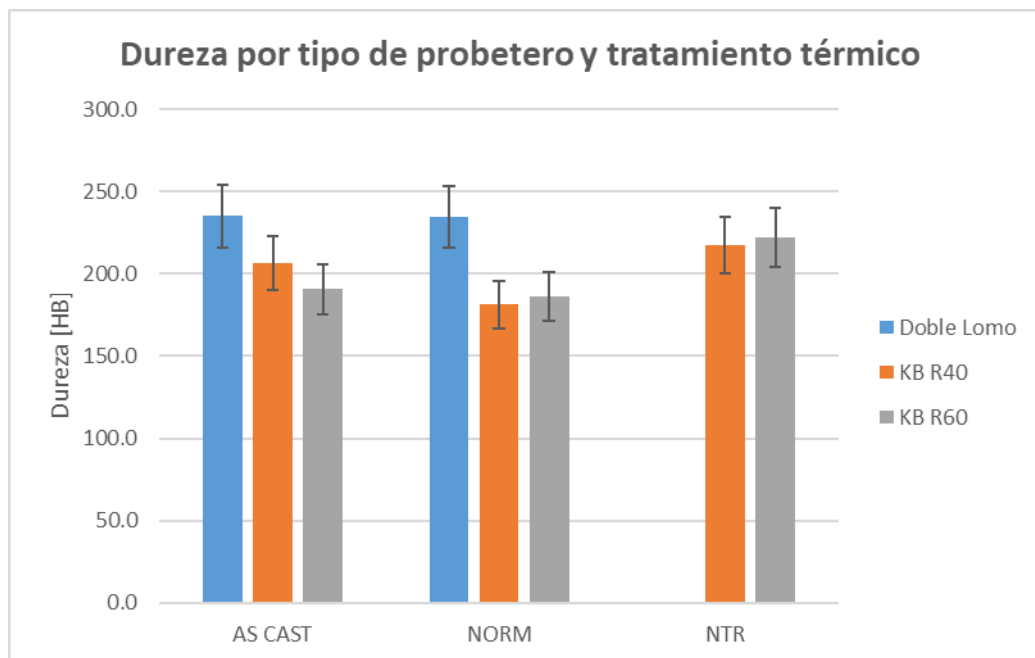


Figura 21. Resumen comparativo de resultados de dureza por tipo de probetero y TT para probetas de colada 2 (60K Gr.C)

En la **Tabla 7** se muestran los valores de gradiente de dureza Rockwell B con precarga de 10 kg y carga de 100 kg para las muestras extraídas de probeteros Keel block. Estas mediciones se realizaron con un durómetro PETRI, propiedad del ITBA. En la **Figura 22** se muestra un resumen de resultados comparativo.

Probeta N°	Radio KB	Valor de dureza HRB @distancia al borde del KB en mm											
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
19	42	86.4	88.9	89.3	92.5	92.6	91.4	91.5	91.6	-	-	-	-
20	42	97.7	99.6	100.0	98.2	97.8	96.5	97.7	97.7	-	-	-	-
22	60	100.7	100.2	100.0	99.1	99.7	97.6	97.8	98.8	96.2	97.6	96.6	96.6
23	60	97.1	100.3	99.6	100.3	99.6	100.7	100.3	99.2	97.4	98.6	97.6	94.3

Tabla 6. Valores del gradiente de durezas Brinell de las probetas Keel block con distinto radio (60K Gr.C)

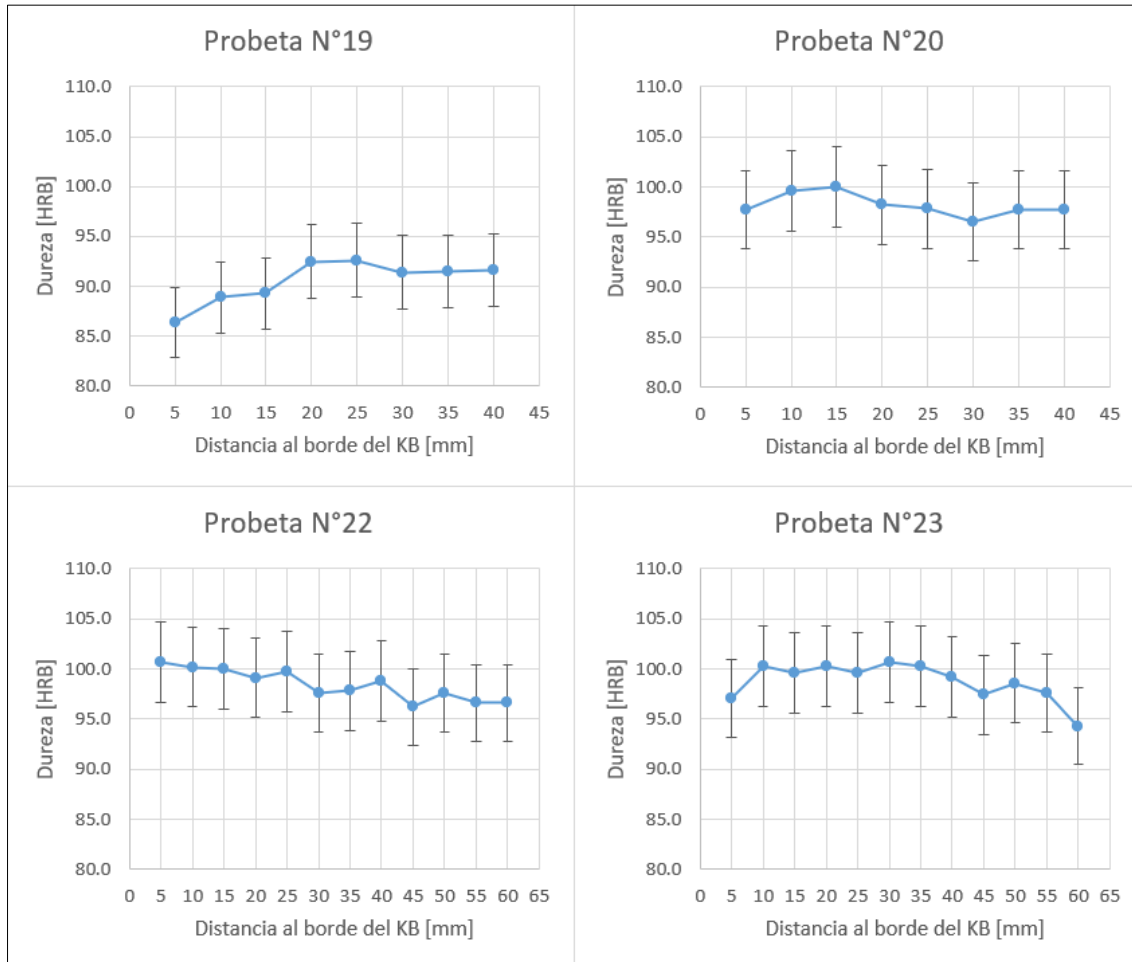


Figura 22. Resumen comparativo de resultados de gradiente de dureza para probetero KB colada 2 (60K Gr.C)

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 14 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	

6 – TRACCIÓN

Se tornearon las probetas de geometría cilíndrica con zona calibrada de 50 mm de largo y 12,5 mm de diámetro. Para ello, se utilizó un torno CNC Haas provisto por el taller del ITBA. Las probetas se fabricaron siguiendo las especificaciones internas de Microwen para probetas de tracción de aceros E 4-003 Rev. 2. Las probetas se ensayaron en una máquina de ensayos de tracción SHIMADZU UH-300kNI, propiedad de Microwen, siguiendo los parámetros de ensayo predeterminados por la empresa para aceros API 60K.

El resumen de los resultados de cada probeta se muestra en la siguiente **Tabla 7**:

	Alargamiento [%]	Estricción [%]	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	R
P7	31.4	55.9	688.1	512.7	1.34
P9	9.2	16.82	602.5	374.3	1.61
P10	27.6	37.27	646.2	426.8	1.51
P12	20.4	26.7	647	396.6	1.63
P13	24.2	37.2	611.72	359.66	1.70
P16	7.8	9.36	974.52	521.01	1.87
P17	28.4	60.05	744.65	552.9	1.35
P19	19.4	26.7	712	365.16	1.95
P20	21.8	32.1	740.3	422.19	1.75
P22	7.2	-	645.57	376.2	1.72
P23	18	30.77	742.2	434.41	1.71

Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos para los ensayos de tracción realizados. Se muestran los valores de diámetro inicial, L_0 , alargamiento %, estricción %, R_m , $R_{p0,2}$ y R

En las **Figura 23 y 24** se muestran las comparaciones entre probetas de los valores obtenidos para la aleación 60K Grado A y Grado C respectivamente:

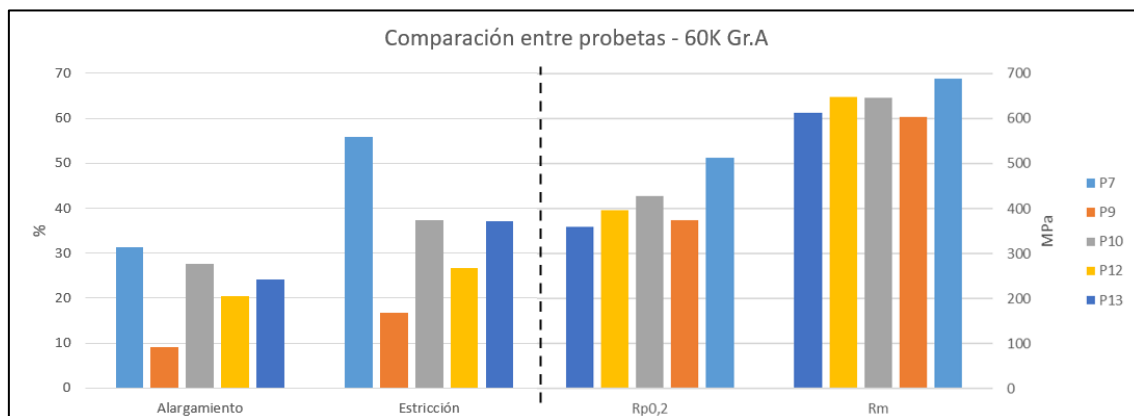


Figura 23. Comparación entre probetas de colada 2 (60K Gr.A). Se muestran: Alargamiento y estricción porcentual, límite de fluencia y a la rotura

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 15 de 26

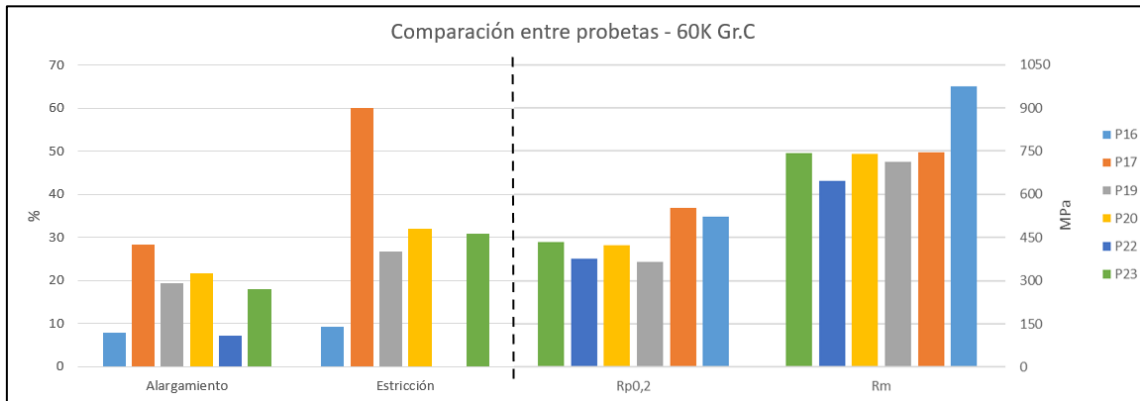


Figura 24. Comparación entre probetas de colada 3 (60K Gr.C). Se muestran: Alargamiento y estricción porcentual, límite de fluencia y a la rotura

7 – OBSERVACIÓN DE SUPERFICIE DE FRACTURA

Una vez traccionadas las probetas, se observaron las superficies de fractura de cada una para identificar los mecanismos de rotura. Para esto, se utilizó una lupa estereoscópica. A continuación, en las **Figura 25 a 35** se muestran y describen las imágenes obtenidas:

P6:



Figura 25. Superficie de fractura dúctil, de morfología tipo “copa-cono” y opaca. Se distinguen distintos puntos de nucleación de fisuras.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 16 de 26

P7:



Figura 26. Se observa una rotura menos dúctil que en el *Figura 25*, siendo la morfología "copa-cono" más chata. Mantiene la superficie opaca indicando micro ductilidad y formación temprana de fisuras en varios puntos de la superficie a la vez.

P9:

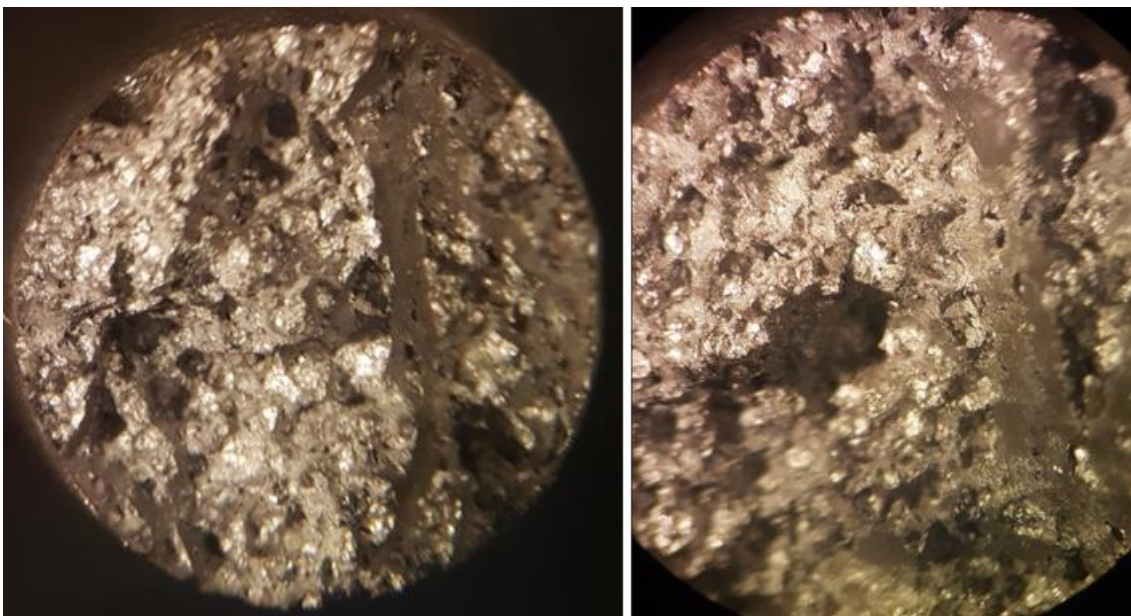


Figura 27. Superficie de fractura principalmente frágil. Se observan relieves pronunciados en algunos puntos de la superficie, indicando ductilidad localizada. La superficie es mayormente brillante y de planos con ángulos discretos, propio de una rotura frágil.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 17 de 26

P10:

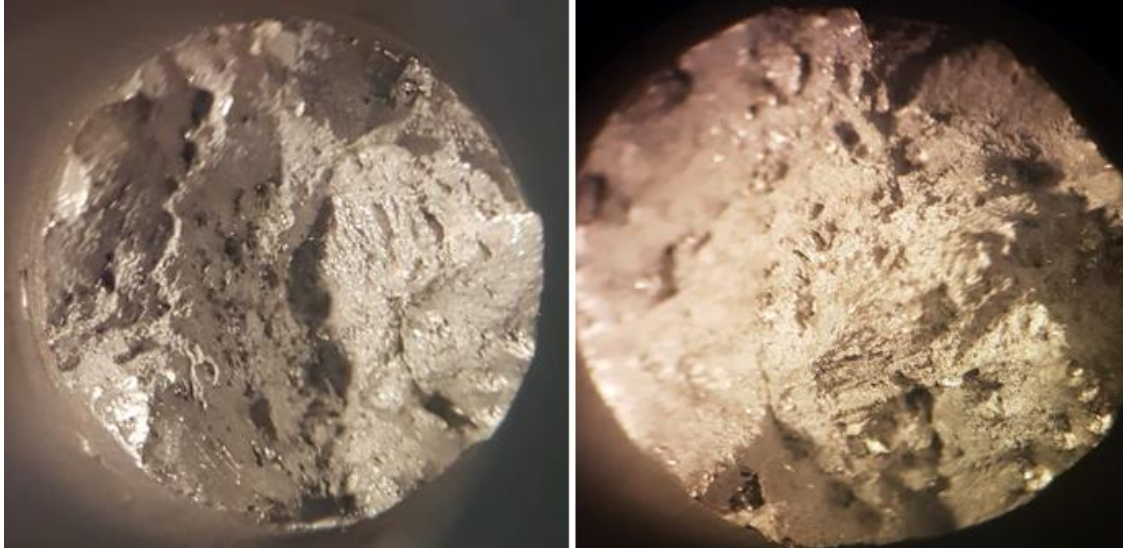


Figura 28. Superficie de fractura dúctil, de morfología tipo “copa-cono” y opaca con algunos puntos brillantes.

P12:

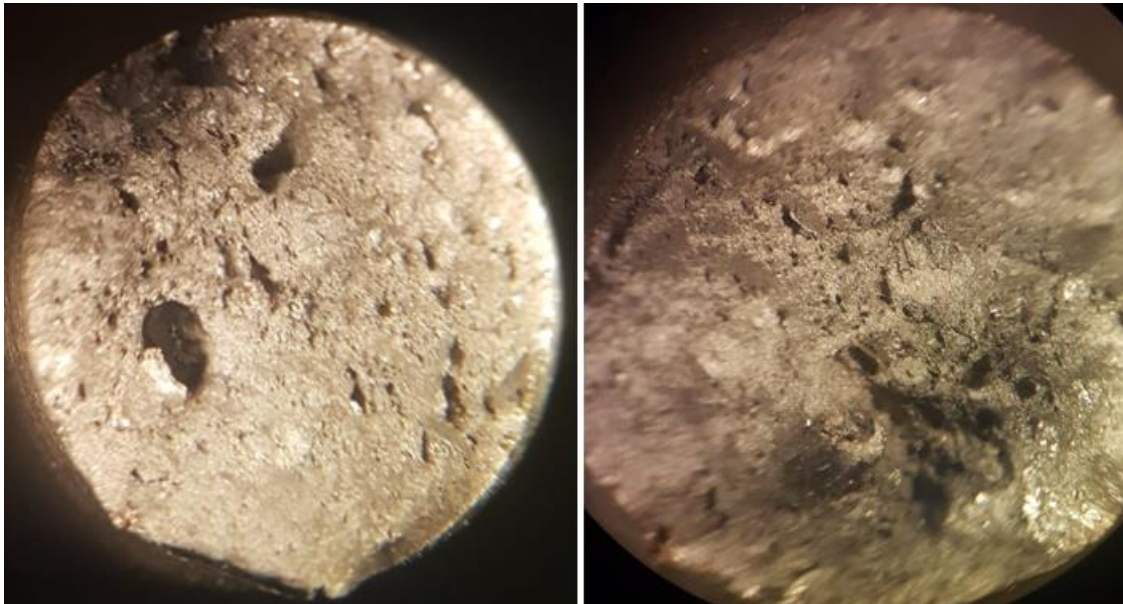


Figura 29. Superficie de fractura similar a la Figura 28 aunque de mayor planitud, indicando una rotura más frágil. La superficie opaca se debe a micro ductilidad, donde se nuclean fisuras que dan lugar a una rotura macroscópica plana y de poca deformación de la superficie

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 18 de 26

P13:



Figura 30. Fractura dúctil con puntos de nucleación visibles en el seno de la probeta. Se observan relieves en la superficie, indicando deformación de la sección previa a la rotura.

P16:

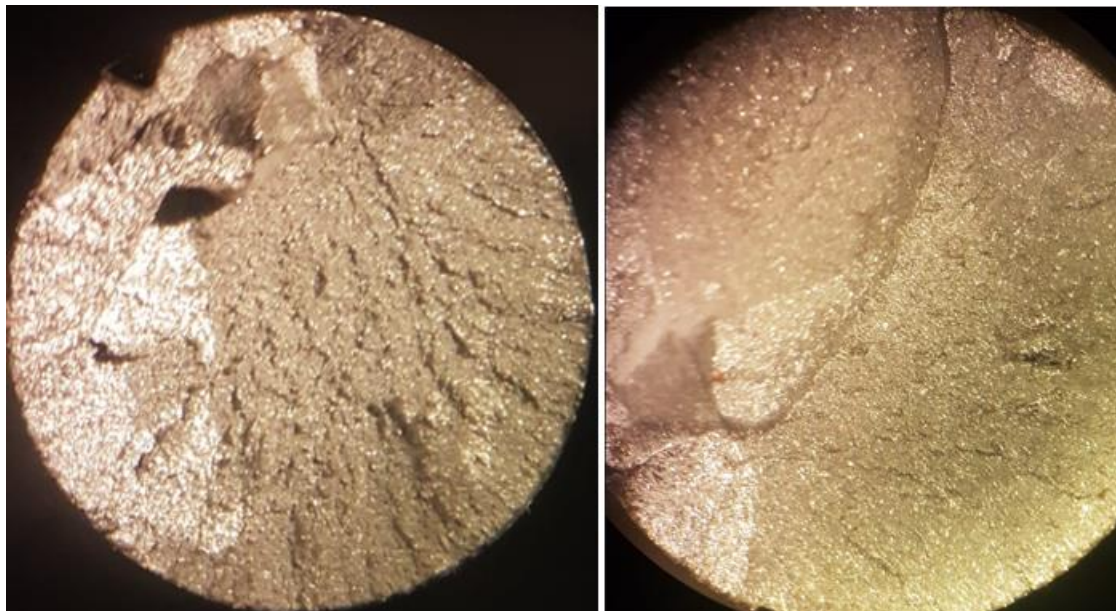


Figura 31. Rotura frágil con micro ductilidad. Se observa una superficie rugosa y con puntos brillantes, con muchos relieves y bordes agudos.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 19 de 26

P19:

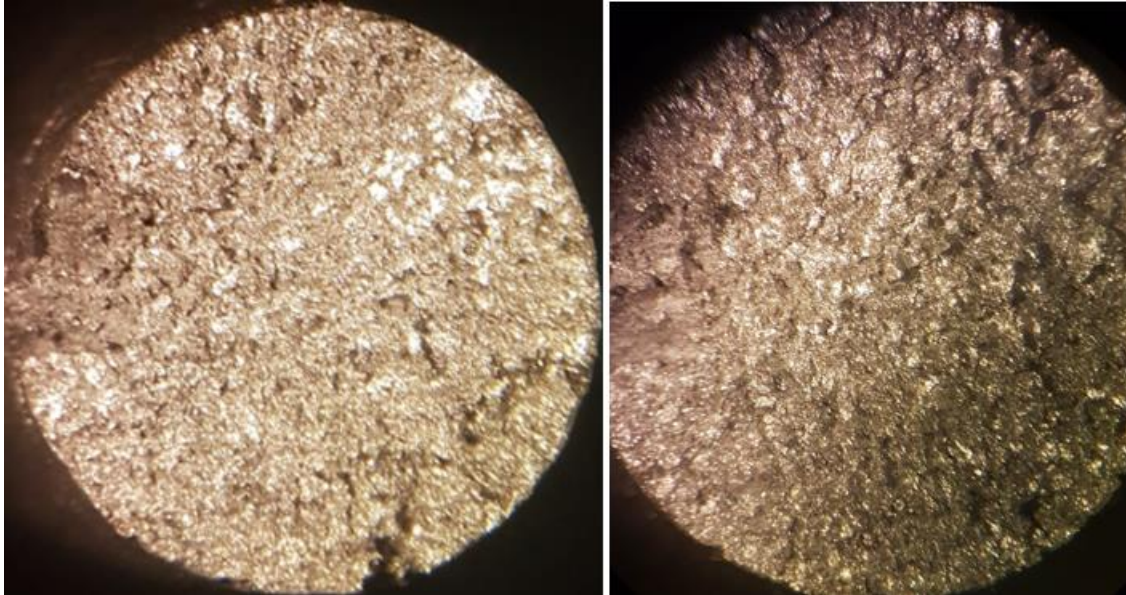


Figura 32. Rotura marcadamente frágil, de superficie brillante, plana y homogénea.

P20:

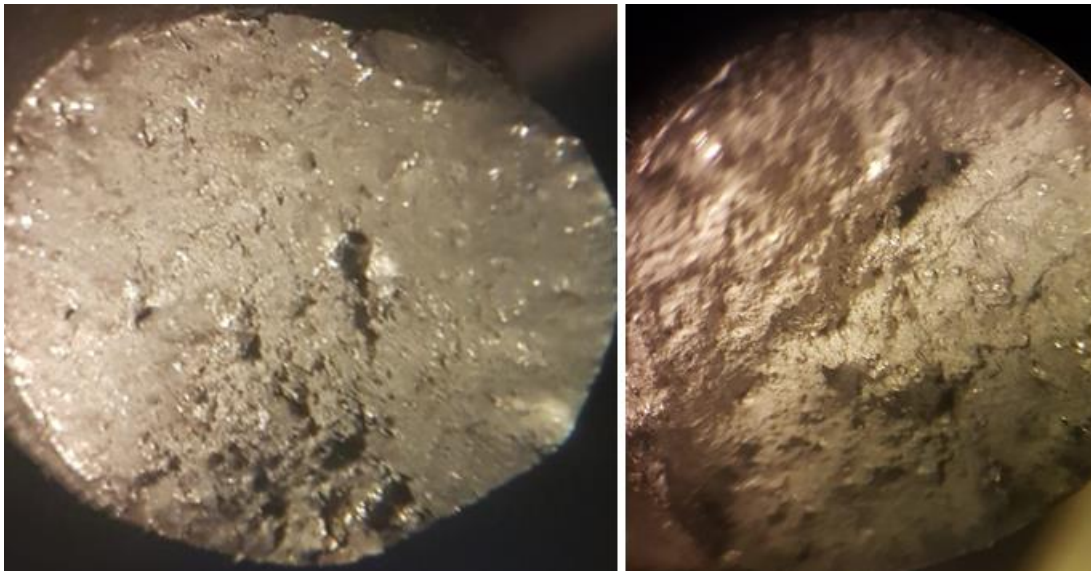


Figura 33. Se observa una rotura dúctil con algo de fragilidad. Si bien hay puntos brillantes en el metal señalando planos de rotura frágil, la mayor porción de la sección es opaca con relieves suaves evidenciando un mecanismo dúctil de rotura.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 20 de 26

P22:

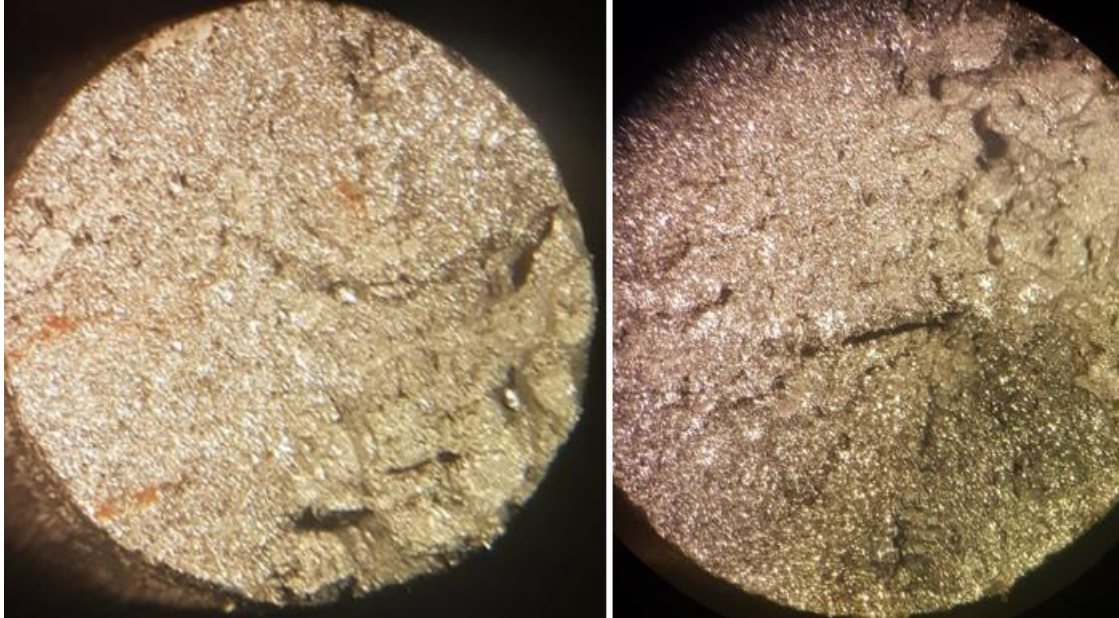


Figura 34. La superficie plana, brillante y de bordes de rotura agudos y bien marcados indican una fractura frágil del material.

P23:

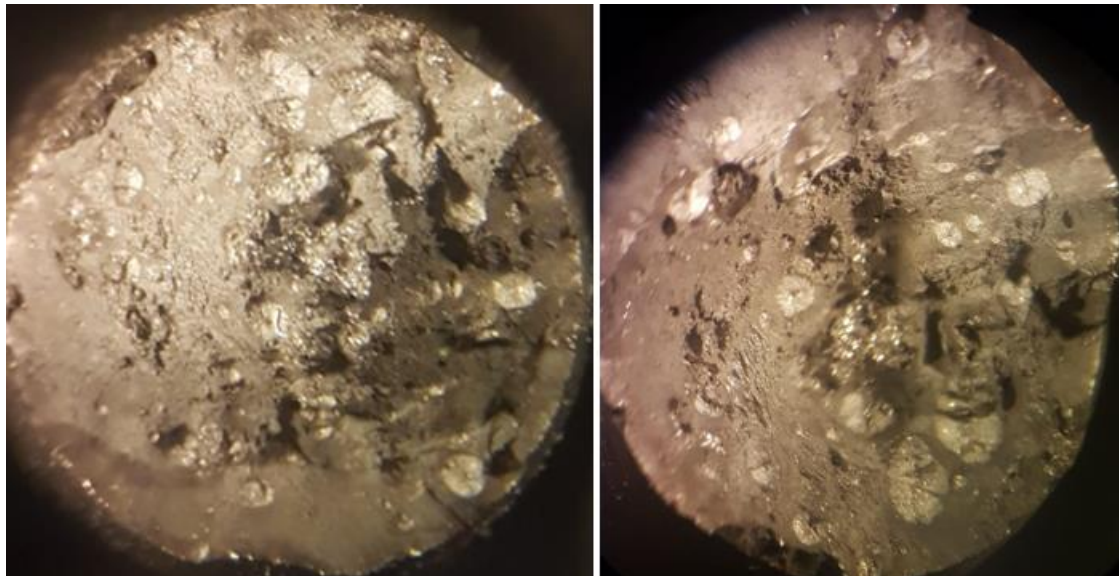


Figura 35. Al igual que en la Figura 30 se observa una rotura dúctil. La superficie es opaca, con puntos de nucleación bien marcados y relieves tipo copa-cono.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 21 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	

8 – IMPACTO CHARPY

Se envió material de cada muestra al laboratorio de ensayos CEDTEC. Allí se fabricaron probetas de Charpy de sección cuadrada de 10 mm, con entalla en “V” a 45° y sección de rotura de 0,8 cm². Se ensayó bajo norma ASTM E-23 a -29°C con un equipo de péndulo para ensayos de impacto de 300 J, marca CIFIC, modelo 020814. Por cada muestra se ensayaron tres probetas. A continuación en la

Muestra Nº	T.T.	Charpy [J]				
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio	Desvío
9	N	40	40	42	41	1
10	NTR	36	34	36	35	1
12	N	42	42	40	41	1
13	NTR	40	44	44	43	2
16	N	16	16	14	15	1
19	N	14	14	12	13	1
20	NTR	14	16	16	15	1
22	N	46	44	42	44	2
23	NTR	46	44	46	45	1

Tabla 8 se muestran los resultados de los ensayos para cada probeta y en la Figura 36 una comparación de los mismos.

Muestra Nº	T.T.	Charpy [J]				
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio	Desvío
9	N	40	40	42	41	1
10	NTR	36	34	36	35	1
12	N	42	42	40	41	1
13	NTR	40	44	44	43	2
16	N	16	16	14	15	1
19	N	14	14	12	13	1
20	NTR	14	16	16	15	1
22	N	46	44	42	44	2
23	NTR	46	44	46	45	1

Tabla 8. Resumen de resultados de ensayos de impacto para cada probeta.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	Pág. 22 de 26

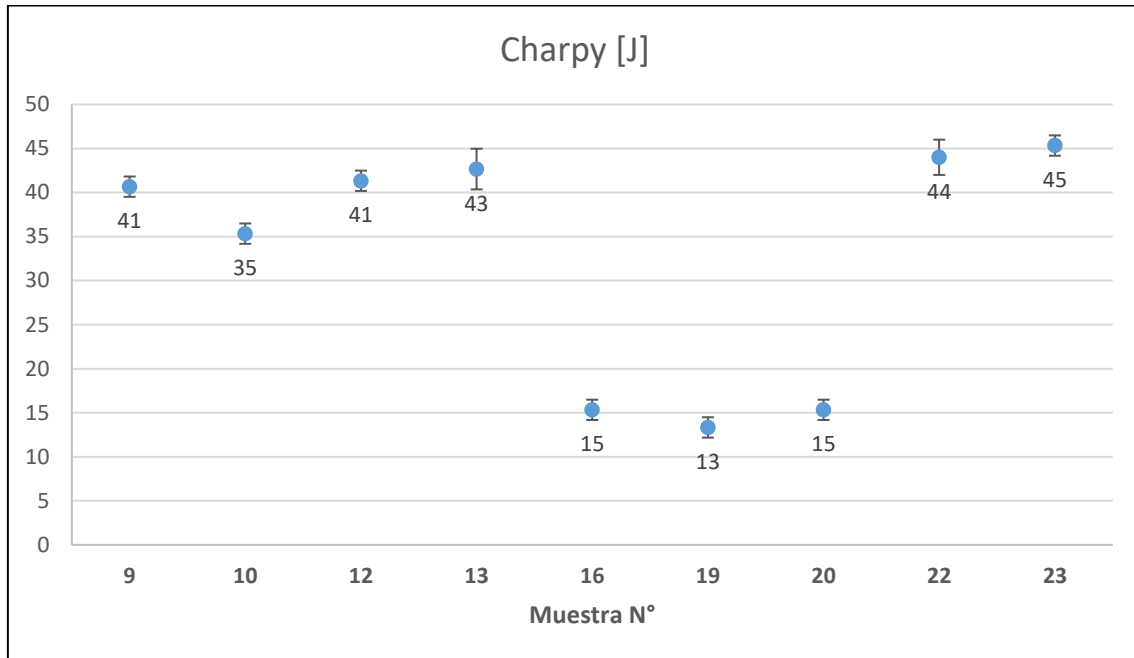


Figura 36. Gráfico comparativo de valores de impacto de Charpy obtenidos para cada probeta.

9 – TEMPLABILIDAD JOMINY

Se tornearon probetas de Jominy a partir de las muestras N°12 y N°22, tomadas de probeteros Keel Block R60 y normalizadas. Para ello, se utilizó un torno manual provisto por el taller del ITBA. Las probetas se fabricaron siguiendo la norma ASTM 255-99. El ensayo se realizó en una máquina de ensayos de Jominy fabricada por alumnos del ITBA y puesta a punto según lo requerido por norma. Previamente, se verificó el buen funcionamiento de la máquina con probetas de materiales con curvas de Jominy conocidas. Los datos de dureza fueron tomados según norma con un durómetro PETRI, propiedad del ITBA. Se siguió la metodología correspondiente para obtener valores de dureza Rockwell C en dos planos paralelos rectificadas sobre las probetas ensayadas. A continuación, se muestran los datos de durezas obtenidos en las **Tabla 9 y Tabla 10** (Probetas N°12 y N°22 respectivamente). En la **Figura 37** se muestran las curvas de Jominy obtenidas.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 23 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	

Probeta N°12: Keel Block R60, colada MW 7877, 60K Gr. A				
Impronta N°	Distancia al borde templado [pulgadas]	Dureza cara 1 [HRC]	Dureza cara 2 [HRC]	Dureza promedio [HRC]
1	0	41,3	39.4	39.4
2	1/16	37.4	31.3	34.4
3	2/16	33.6	28.2	30.9
4	3/16	29.7	26.3	28.0
5	4/16	27.6	25.9	26.8
6	5/16	27.0	24.5	25.8
7	6/16	24.0	25.7	24.9
8	7/16	23.9	23.4	23.7
9	8/16	23.0	21.3	22.2
10	9/16	22.6	22.7	22.7
11	10/16	25.2	23.0	24.1
12	11/16	21.4	21.0	21.2
13	12/16	22.5	20.3	21.4
14	13/16	22.5	19.6	21.1
15	14/16	20.8	21.3	21.1
16	15/16	22.7	23.6	23.2
17	1	20.7	21.1	20.9
18	1.125	19.4	19.3	19.4
19	1.25	19.1	22.7	20.9
20	1.375	18.3	20.0	19.2
21	1.5	17.9	20.1	19.0
22	1.75	17.4	17.9	17.7
23	2	16.4	17.6	17.0
24	2.25	16.7	17.0	16.9
25	2.5	16.8	17.5	17.2

Tabla 9. Valores de dureza obtenidos durante el ensayo de Jominy para la Probeta N°12.

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 24 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	

Probeta N°22: Keel Block R60, colada MW 7925, 60K Gr. C				
Impronta N°	Distancia al borde templado [pulgadas]	Dureza cara 1 [HRC]	Dureza cara 2 [HRC]	Dureza promedio [HRC]
1	0	49.6	51.5	50.6
2	1/16	50.2	52.3	51.3
3	2/16	47.9	50.8	49.4
4	3/16	46.5	48.9	47.7
5	4/16	44.9	47.2	46.1
6	5/16	44.4	46.2	45.3
7	6/16	43.1	45.2	44.2
8	7/16	42.3	43.6	43.0
9	8/16	42.0	40.4	41.2
10	9/16	40.4	38.8	39.6
11	10/16	38.6	39.7	39.2
12	11/16	38.0	37.0	37.5
13	12/16	36.9	39.4	38.2
14	13/16	37.7	38.0	37.9
15	14/16	36.9	37.1	37.0
16	15/16	36.0	37.4	36.7
17	1	34.3	37.3	35.8
18	1.125	34.7	34.7	34.7
19	1.25	33.6	33.5	33.6
20	1.375	35.5	36.2	35.9
21	1.5	35.8	34.9	35.4
22	1.75	33.7	35.2	34.5
23	2	33.9	33.6	33.8
24	2.25	33.1	36.6	34.9
25	2.5	33.7	35.2	34.5
26	2.75	35.5	35.7	35.6
27	3	35.6	35.2	35.4

Tabla 10. Valores de dureza obtenidos durante el ensayo de Jominy para la Probeta N°22.

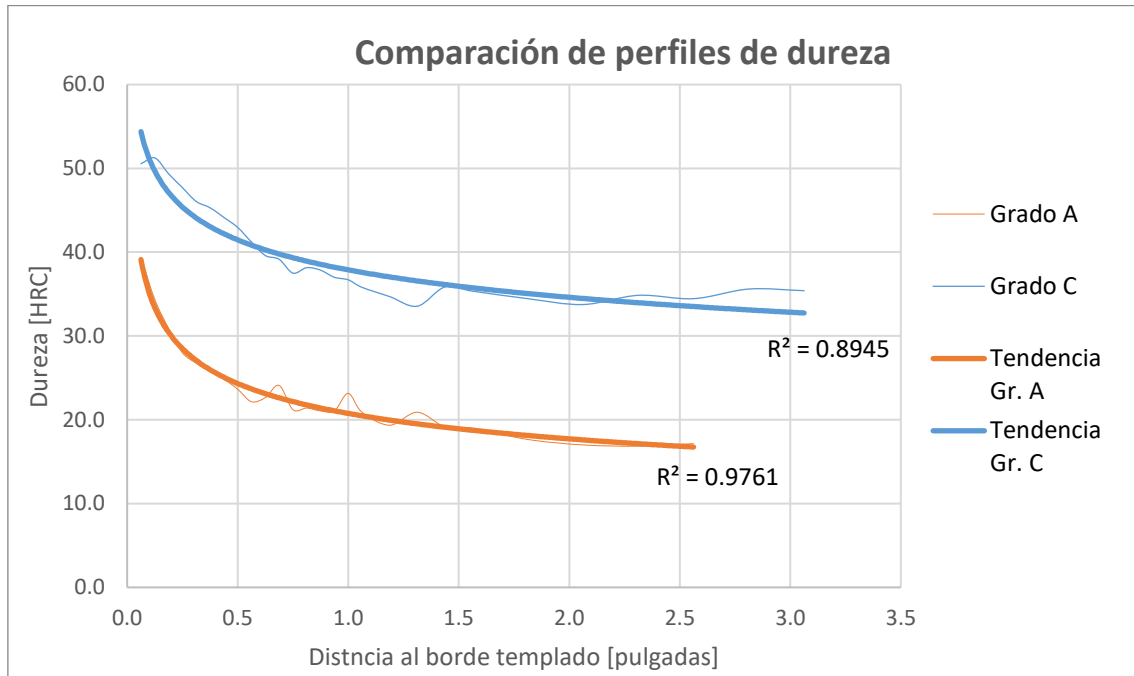


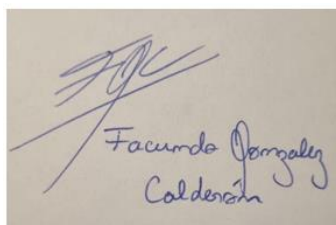
Figura 37. Gráfico comparativo de las curvas de Jominy obtenidas para las probetas N°12 (Gr. A) y N°23 (Gr. C)

	INFORME DE ENSAYO	Informe N° IE-PF-2023-01 Pág. 26 de 26
	Ensayos y caracterización de acero API 60K Gr.A y Gr.C	

10 – CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado sobre las propiedades del acero aleado fabricado bajo norma API 6A tipo 60K “Grado A” y su variante “Grado C”, se concluye que los resultados obtenidos muestran distintas tendencias y características según el tipo de aleación y los espesores de las probetas utilizadas para su fabricación, de las cuales se destacan las siguientes:

- Se observó que a mayor cantidad de aleantes, los mismos logran segregar a borde de grano y permanecer allí en cierta medida a pesar de los tratamientos térmicos.
- A mayor espesor de pieza (mayor radio de probetero Keel Block), mayor tamaño de grano en general.
- Los gradientes de dureza no tienen efecto en los espesores estudiados y los valores de dureza no varían significativamente a pesar de los cambios de probeteros y tratamientos térmicos.
- En comparación, las probetas de acero “grado C” obtienen valores de dureza mayores que las de acero “grado A” a mismo porcentaje de carbono. Esto indica una sinergia de los aleantes en el acero.
- Los porcentajes de estricción y alargamiento aumentan en las piezas revenidas por sobre las normalizadas. Sin embargo, los valores de $R_{p0,2}$ y R_m se mantienen entre piezas con distinto tratamiento térmico pero aumentan en probeteros de menor espesor.
- El acero “grado C” obtiene levemente mejores propiedades de resistencia ($R_{p0,2}$ y R_m) que el acero “grado A”.
- Las probetas de mayor espesor resultaron más frágiles que las más esbeltas. Al mismo tiempo, las revenidas resultaron más dúctiles que las normalizadas. En términos generales, el acero “grado C” se observó más frágil que el acero “grado A”.
- En cuanto a la resiliencia, el acero “grado A” no mostró diferencias a diferentes espesores ni en comparación al espesor mayor del acero “grado C” (Keel Block radio 60). Haciendo foco en el acero “grado C”, se puede notar un decaimiento de la energía absorbida durante el impacto en probetas de espesor pequeño (Doble lomo y Keel Block radio 40).
- Comparativamente, el acero “grado C” resultó ser más templable y obtener mayor dureza bajo temple que el acero “grado A”.



Facundo González
Caldersón

NOMBRE Y APELLIDO
REALIZÓ



Andrés Rodríguez

NOMBRE Y APELLIDO
APROBÓ

“El laboratorio certifica que resultados informados corresponden a las muestras recibidas en su laboratorio. El laboratorio no comunicará a terceros ni publicará los resultados de los ensayos, análisis, pruebas o estudios encomendados por terceros, pero se reserva el derecho de utilizar los resultados, sin individualizar, con fines exclusivamente estadísticos, para uso interno y/o académicos”